

Úprava vzduchu v historických objektech

AIR treatment
in historical buildings



Prof. Ing. Miloslav NĚMEČEK, DrSc.,
ČVUT v Praze,
Fakulta elektrotechnická

Doc. Ing. Karel PAPEŽ, CSc.
ČVUT v Praze,
Stavební fakulta

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Příspěvek pojednává o problematice ochrany cenných obrazů, nástěnných maleb, pozlacených povrchů a jiných součástí výzdoby vnitřních prostorů masivních historických budov. Analýza významu teploty a vlhkosti vnitřního vzduchu ukázala na význam termodynamické rovnováhy, reprezentované sorpčními izotermami různých materiálů sledovaných děl. Uvážena byla také tepelná setrvačnost konstrukce masivní budovy. Ke sjednocení obou zásadních hledisek byla vyvinuta racionální metoda definování vhodných parametrů stavu vnitřního vzduchu. Je založena na křivce vnitřní teploty (rov. 2), kopírující průběh vyhlazené venkovní teploty, kdežto vnitřní relativní vlhkost závisí na vnitřní teplotě (rov. 3), vyhovující – pokud možno – všem materiálům sledovaných děl s vhodným intervalem kolem sorpční rovnováhy. Metoda byla použita v návrhu ochrany 129 gotických obrazů a zlacených výzdob v Kapli sv. Kříže na gotickém státním hradu Karlštejn ve středních Čechách. Klimatizační zařízení se zvláštním programem řízení bylo dodáno a je od podzimu 1999 v provozu.

Klíčová slova: klimatizace, historické objekty, regulace

The paper deals with problems of saving valuable pictures, wall paintings, surface gilding, premises and other diverse components of decoration in interiors of massive historical buildings. The analysis of the role of both temperature and humidity of the interior air proves the important role of thermodynamical equilibrium which is represented by sorption isotherms of diverse materials taking part. On the other side, however, the thermal inertia of the construction of the massive building has to be considered. To unite these both principal points of view, a rational method to define a convenient state parameters of interior air was developed. It bases on an interior temperature curve (Eq. 2) copying the character of a smoothed exterior temperature, whereas the interior relative humidity depends on the interior temperature (Eq. 3) to comply with a convenient interval around the sorption equilibria as possible of all materials taking part. The method was applied in the project of saving 129 gothic pictures and golden decoration of the Saint Cross Chapel of the gothic State castle Karlštejn in central Bohemia. An air conditioning unit with a special programmed control system were delivered and, since Autumn 99 set in service.

Key words: air conditioning, historical buildings, control

V historických objektech je dlouhodobá záruka dobrého stavu památkově chráněné výzdoby a mobiliáře v interiérech prvořadým cílem. Neopominutelnou součástí této péče je zabezpečení trvale příznivého stavu vnitřního vzduchu. Není to samozřejmě činitel jediný a musí být uplatněn v souladu s ostatními činnostmi památkové péče.

V tomto příspěvku vycházíme z analýz a zkušeností získaných při řešení náročných úloh ochrany vý-

zdoby státního hradu Karlštejn vhodným mikroklimatem. Užitý pojem „zabezpečení trvale příznivého stavu“ vzduchu v interiéru je však velmi široký a zasluhuje si všestrannou pozornost. Ta je také jedním z hlavních důvodů, proč byl následující příspěvek napsán. V tomto pojmu je totiž skryt obsaženo široké spektrum hledisek a činností, fyzikálních činitelů a pro ně platných zákonů, nutných ohledů a možných i dostupných opatření a technických řešení. Tento výčet však není akademickou konstruk-

cí. Je výsledkem analýzy, která mu předcházela a zkušeností získaných při řešení konkrétní úlohy – celoroční úpravy vzduchu v Kapli Sv. Kříže a některých problémů v kostela Nanebevzetí P. Marie. K tomu alespoň ve zkratce.

První studie a analytické práce, zahájené v říjnu 1998 značně usnadnil monitoring venkovního stavu a vnitřních teplot a relativních vlhkostí v různých prostorách hradu, m.j. i ve Velké Věži, kde se Kaple

Sv. Kříže nachází. Díky monitorovaným datům bylo možno zodpovědně zvolit koncepci řešení, v dubnu 1999 předat projekt jednotky pro úpravu vzduchu a vybrat dodavatele, který jednotku vyrobil a předal koncem listopadu téhož roku do zkušebního provozu.

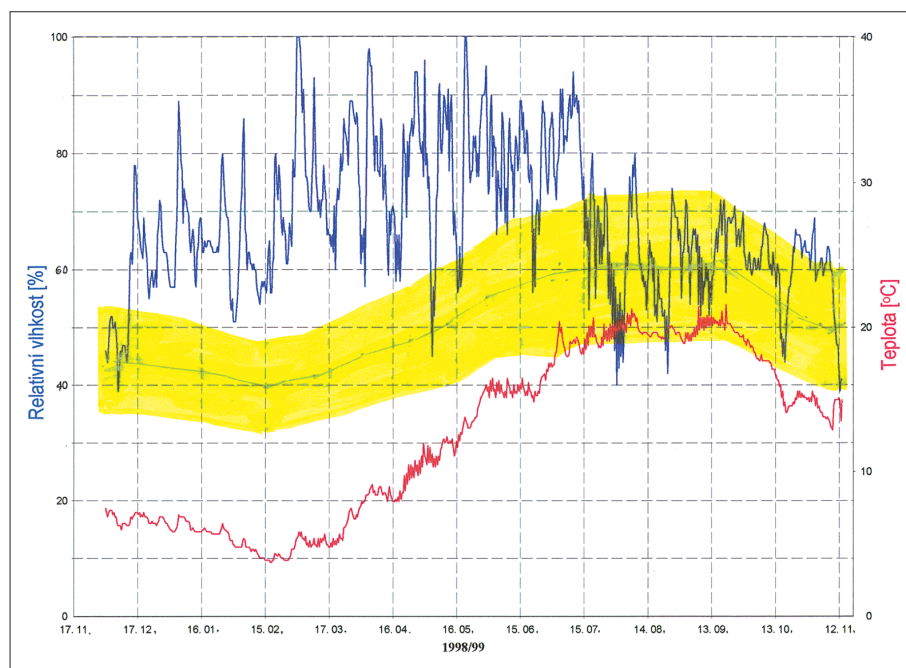
Zkušební provoz byl zaměřen na „režim klimatického přizpůsobení“ Kaple k instalaci obrazů Mistra Theodorika v březnu 2000. Ty byly zčásti uloženy na hradě, značný počet jich byl vystaven v Národní galerii v Klášteře Sv. Anežky, v klimatizovaném prostředí se stálou teplotou a úzkou mezí relativní vlhkosti. Tyto parametry však v Kapli, která byla 10 let prázdná, nebylo možno ani přibližně (cca 20 °C, 60 % r.v.) k datu jejich přivezení zajistit. Od března 2000 pak byla jednotka doplněna vlhčením přístroji Defensor a uvedena do trvalého provozu s tím, že parametry stavu vzduchu požadované v Kapli a řízené automatickou regulací jednotky budou v případě potřeby, ovšem pouze minimálně, postupně upraveny podle reakcí systému na konkrétní situaci venku.

Z předchozího úvodního výkladu je zřejmá složitost úlohy. Jednotka s jejím automatickým řízením plus interiér Kaple s jeho výzdobou a obrazy a nakonec i sousedící prostory Velké Věže je nutno chápat jako systém. Se zřetelem na rozsah článku se zde nebudeme zabývat podrobným popisem sledování celého problému od analytické studie až po realizaci a záměry pro dlouhodobý provoz celého systému. Omezíme se především na hlavní principy a přístupy jichž jsme využili k řešení klimatu Kaple. Podrobný popis jednotky, jejího řízení, vlastností, dosažených parametrů a zkušenosti z více než ročního provozu, který splňuje naše předpoklady ponecháme na nejbližší z příštích příspěvků.

PŘÍSTUPY K ŘEŠENÍ

Řešení úlohy zabezpečit v historické stavbě stav vzduchu trvale příznivý jak pro vybavení a výzdobu interiéru, tak i pro jemu příslušné části stavební konstrukce závisí ve většině případů na vymezení pojmu „příznivý“. Jde totiž o kompromis mezi nároky jednotlivých prvků interiéru na stav vzduchu kterým je chráníme. Dalším našim úkolem je zde zabezpečit monitoring stavu prostředí pro spolehlivé posouzení jeho účinků na interiér a jeho výzdobu.

Pokus o systematickou klasifikaci vlivů, činitelů, opatření atd. se obvykle míjí cíle, proto zůstaneme pouze u jejich výčtu a hodnocení, směřujících k uplatnění fyzikálních zákonů jako objektivizující cesty k úvahám směřujícím k technické realizaci. Přes řadu dalších hledisek památkáře i restaurátora bude hlavním předmětem naší pozornosti tepelně-vlhkostní stránka působení vzduchu v interiéru na historicky cenný předmět. V ní je dominantní otázkou relativní vlhkosti vzduchu obklopujícího



Obr. 1 Prázdná Kape – Presbyteriální klenba. Žluté pásmo žádoucí relativní vlhkosti (vztah (3))

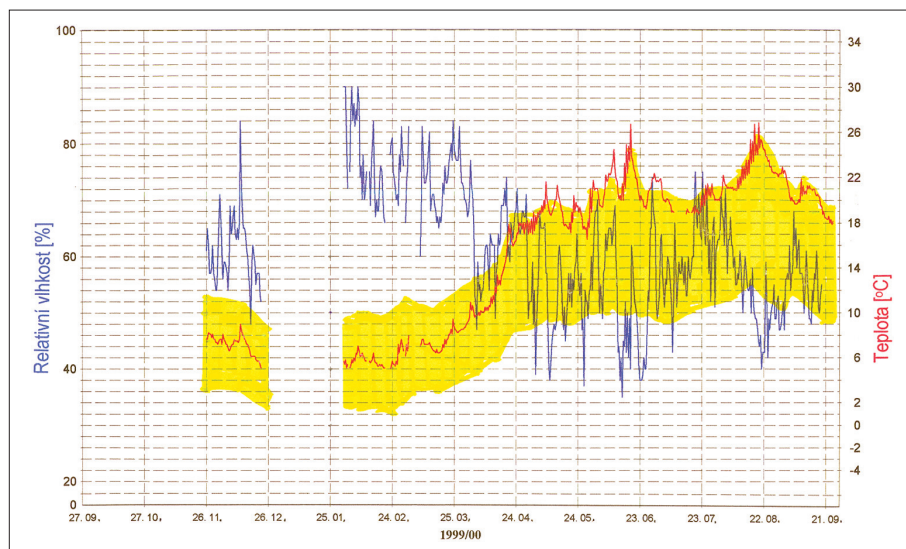
chráněný předmět, jeho trvalé či opakované nepřipustné navlhčení nebo vysušení, a následující analyzující výčet tomu odpovídá.

V něm je nutno se zaměřit na následující faktory

☐ Hmotnost stavební konstrukce. Zdivo historických staveb je obvykle velmi masivní. Kolísání teploty interiéru je vlivem značné tepelné kapacity zdiva nepatrné a denní kolísání venkovní teploty se prakticky neprojeví. U většiny objektů se neprojeví ani týdenní změny a jejich odezva je časově značně (i o několik týdnů) zpožděná. Průběh teploty v interiéru často připomíná sinusovku kolem střední roční teploty s periodou 1 rok. Její, značně tlumené vyšší

harmonické způsobuje infiltrace vzduchu netěsnostmi oken, dveří vlivem větru a vztlakovému efektu vysokých prostorů. Dokládají to monitorované [1] roční průběhy teploty v tehdy neklimatizované Kapli Sv. Kříže (obvodové zdivo Velké Věže o tloušťce cca 3,6 m – Z, J, V zeď a cca 6,0 m – severní zeď) na obr. 1 a v kostele Nanebevzetí P. Marie (obvodové zdivo Mariánské Věže o tloušťce cca 3,4 m) na obr. 2. Jak se ukáže dále, má útlum kolísání teploty v interiéru zásadní význam.

☐ Měrná vlhkost venkovního vzduchu. Tato hodnota během dne poměrně málo kolísá. Pokud nejde o přímý vliv dešťových srážek nebo příchod mlhy a vzduchu v blízkosti nasycení,



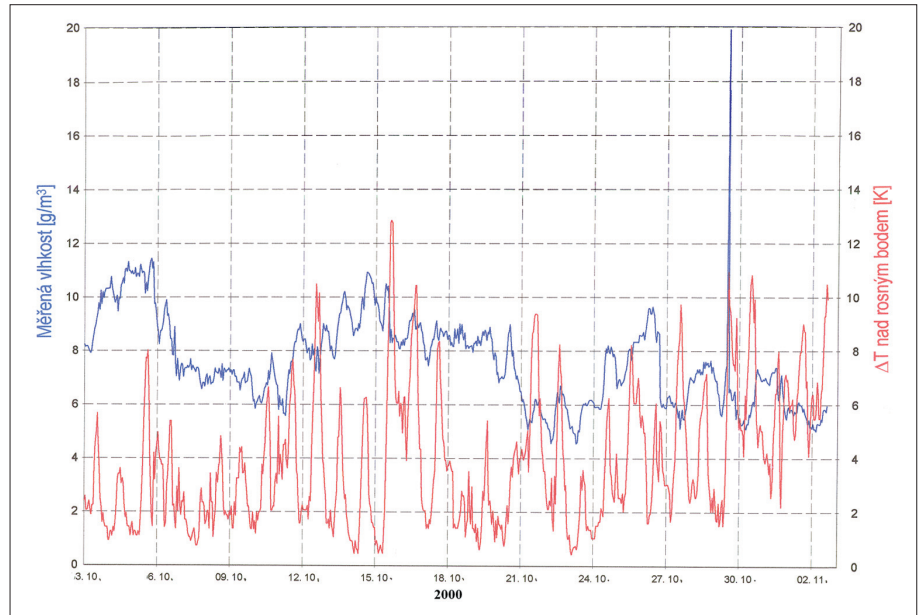
Obr. 2 Nevytápěný kostel Nanebevzetí P. Marie. Kostel – sloup horní. Žluté pásmo žádoucí relativní vlhkosti (vztah (3))

Ize nalézt vztah mezi zvýšením měrné vlhkosti a oteplením během dne (vypařování z volných povrchů v přírodě). Důležitost měrné vlhkosti vzduchu vyplývá z toho, že jednak je to extenzivní, tj. zachovací veličina, jednak se její změny velice rychle projevují při infiltraci venkovního vzduchu do interiéru a v navlčování přítomných povrchů, někdy dokonce nebezpečnou kondenzací. Velká vlhkost vzduchu svědčí mj. rozvoji mikroorganismů popř. dřevokazného hmyzu. K tomu většinou také přispívá omezená schopnost interiéru akumulovat v různých místech podstatná množství vlhkosti při stavech vzduchu, jež jsou v interiérech žádoucí.

O změnách měrné vlhkosti x^* venku svědčí například monitorovaný záznam na obr. 3. Průběh na ni vázané měrné vlhkosti v interiéru kostela P. Marie je patrný z obr. 4, v obou případech v jednotkách $g \cdot m^{-3}$ užívaných u instalovaného monitorovacího přístroje.

□ Teplotní pole, tj. rozložení teploty v různých výškově odlehých místech interiéru v čase hraje důležitou úlohu pro informaci o aerodynamických poměrech v prostoru. Jeho variantnost může svědčit buď o pohybu vzduchu samovolnou teplotní konvekcí, nebo, naopak o „zvrstvení“ různých teplých vzduchových hmot (analogické teplotní meteorologické inverzi). Rozhodnutí, o který z jevů jde, je většinou obtížné. V prvním případě může někdy pomoci současný výskyt souběhu kolísání měrné vlhkosti v interiéru s měrnou vlhkostí venku např. při netěsných oknech. Důležitou roli v této informaci také hraje rozmístění čidel v prostoru. Na teplotní inverzi je možné usuzovat z porovnání dvou teplotních záznamů např. z prostoru uprostřed kostela P. Marie (obr. 5). Jedno z čidel bylo umístěno na sloupu 800 mm pod stropem (S. H.), druhé na téměř sloupu, 800 mm od podlahy (S. D.). Rozdíl teplot je prakticky trvalý, nicméně jistotu o existenci inverze přinesl až pokus o její rozbití instalací stolního ventilátoru o průměru 400 mm.

Teplota a na ní závislá relativní vlhkost vzduchu v interiéru jsou sice intenzivní (nezachovací) veličiny, jsou však společně hnacími silami v procesu nastolení termodynamické rovnováhy mezi vlhkým vzduchem a povrchy předmětů, které v interiéru mohou přijímat resp. uvolňovat vlhkost. Stav takové rovnováhy se v technologii sušení znázorňuje sorpčními izotermami [2] známými pro různé látky. Jejich ukázka je v obr. 6, z něhož je zřejmé několik skutečností. Je to především jejich sklon vyjadřující pro určitý materiál závislost změny rovnovážné vlhkosti u^* na změně relativní vlhkosti ϕ okolního vzduchu. Dále je to poloha izoterm. Čím více vpravo leží, tj. směrem k vyšší hodnotě u^* a čím strmější je její směrnice $\Delta\phi / \Delta u^*$, tím menší je relativní změna $\Delta u^* / u^*$ vyvolaná změ-

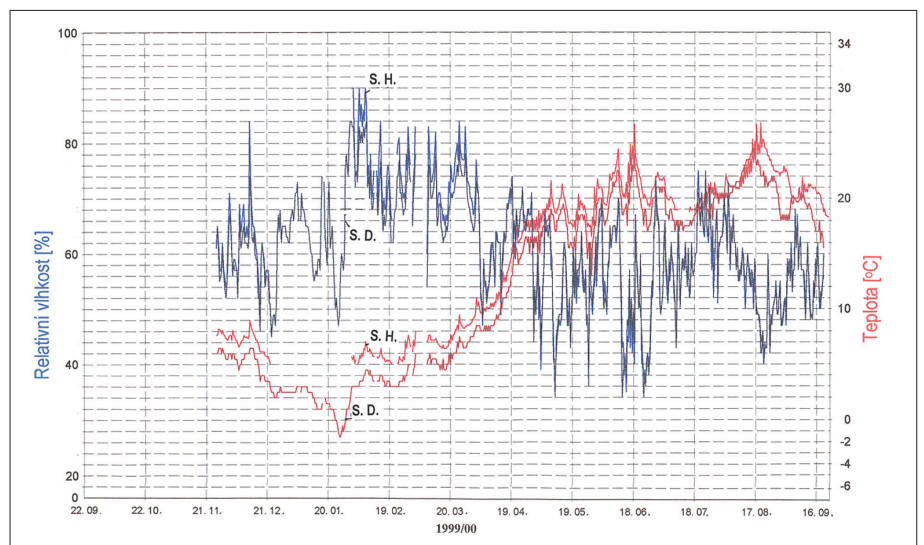


Obr. 3 Průběh externí objemové měrné vlhkosti x^* v dekadě od 3. 10. 2000



Obr. 4 Průběh x^* v kostele N. P. Marie v dekadě od 3. 10. 2000

Sloup horní. Zřejmá korepondence s obr. 3 svědčí o značné infiltraci venkovního vzduchu do interiéru.

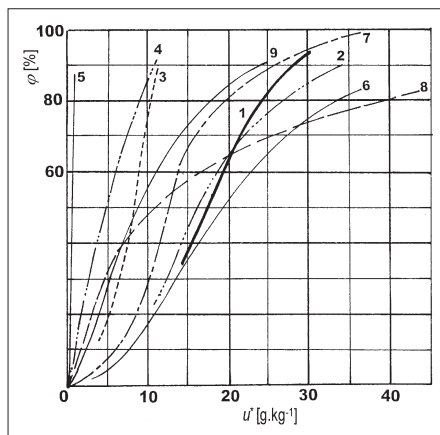


Obr. 5 Podezření na teplotní inverzi v kostele N. P. Marie (do dubna 2000 nepřístupný návštěvníkům)

Sloup horní. Zajímavá je praktická shoda relativních vlhkostí.

nou $\Delta\varphi$ relativní vlhkosti. Další významnou vlastností sorpčních izoterem je jejich malá křivost v oblasti $\varphi < 40, 60 > \%$, jejíž vhodnost pro naše účely („trojúhelníková podobnost“) je mimo diskusi. Poslední vlastností sorpčních izoterem je jejich závislost na teplotě. Názorně to demonstruje obr. 7, v němž jsou zakresleny sorpční izotermy dřeva pro několik teplot. Z něj je zřejmý objektivní důvod zdánlivě subjektivního pocitu „vlhkých peřin“ nebo nábýtku v zimě v nevytopené chalupě. V zimě je sice měrná vlhkost venku velmi nízká, relativní vlhkost je však naproti tomu vysoká. Nízká venkovní teplota s vysokou relativní vlhkostí se do interiéru nevytápěné budovy během doby dostanou a objektivní důsledek – podstatné zvýšení rovnovážné vlhkosti předmětů v nevytápěném interiéru se nutně projeví, jak je zřejmé pro $\varphi = 90 \%$ díky zakřivení izoterem z horní části obr. 7. To má ovšem paralelu i pro organické a anorganické materiály reagující na teplotu a vlhkost vzduchu v nevytápěném prochlazeném interiéru masivní historické stavby. Závažnost tohoto pohledu na interiéru masivní stavby spočívá především v slabé závislosti vnitřní teploty na teplotě venku, kdy jsou zde splněny podmínky pro dostatečně malé kolísání termodynamické (teplotně-vlhkostní) rovnováhy v zúčastněných materiálech, a to i pro poměrně hmotné předměty. Neméně závažný je fakt, že „rodina“ sorpčních izoterem poskytuje pro daný materiál přímo předpis pro řízení relativní vlhkosti vzduchu v závislosti na teplotě tak, aby rovnovážná vlhkost materiálu u^* byla udržena v požadovaných mezích. Geneze takového předpisu je zřejmá z obdélníku $T_{\max}, T_{\min}, \varphi_{\max}, \varphi_{\min}$ vyznačeného v obr. 7. Na další příznivou vlastnost sorpčních izoterem – přibližnou geometrickou podobnost jejich průběhů – pro řadu materiálů přicházejících v historických objektech v úvahu – bude poukázáno v textu o realizaci.

- Závislost objemových změn chráněných předmětů na okamžité a rovnovážné vlhkosti $\Delta u^* = u^* - u$ jejich materiálů. Pokud je extrémně nízká nebo vysoká, je v našem přístupu součástí jedné z hypotéz původu jejich poškození. Jde zde o tvarové změny různých spojených vrstev, např. dřevěných desek obrazů s malbou a napětí způsobující praskliny ve vrstvách malby, bobtnání možného organického podkladu malby a ztlacení, projevující se bublinami a odchlipeními apod. Preventivním měřítkem je např. šíře pásma poměru $\Delta u^*/u_m^*$ pro vhodné zvolený reprezentativní materiál a jeho hodnoty v okolí požadované hodnoty u_m^* , která se mj. nesmí v čase strmě měnit.
- Materiálová, technologická a rozměrová rozmanitost chráněných objektů a často neznámé materiály použité jak tvůrcem pro celé dílo, tak místně při opravách a restaurátorské

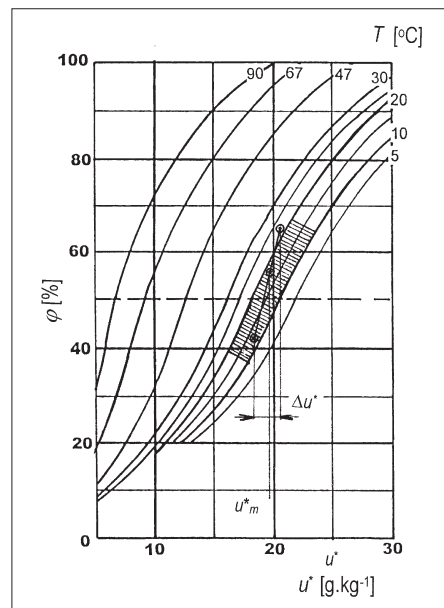


Obr. 6 Sorpční izotermy různých materiálů při 25 °C
1 – dřevo, 2 – dřevotřísková hmota, 3 – klij, 4 – želatina, 5 – asbest, 6 – tabák, 7 – žito, 8 – jablka, 9 – mýdlo

údržbě. Tento faktor je hlavní příčinou hledání ideálního kompromisu při rozhodování o vhodných parametrech vzduchu upravovaného s cílem „co nejméně“ poškodit chráněné objekty jako soubor. Sám o sobě tento cíl představuje speciální téma úvah o prioritách ochrany.

Uvedené faktory souvisící s tepelně-vlhkostními vlastnostmi vzduchu lze považovat za dominantní. Je však ještě celá řada dalších, které je nutno vzít při úpravě vzduchu v úvahu.

- Z uměle vyvolaných činitelů je nejdůležitější proudění vzduchu v prostoru. Souvisí úzce s teplotou, jejíž rozdíly podporují samovolné konvektivní složky jeho rychlosti. Za určitých složitých podmínek však tyto rozdíly také mohou ve vysokých prostorech vyvolat už zmíněnou teplotní inverzi (oddělení dvou teplotně rozdílných ale nepohyblivých vrstev vzduchu) a vznik prochlazených „mrtvých“ koutů a mikroprostorů resp. teplých vlhkých „polštářů“ pod klenbami, příznivých pro vznik kondenzace, vývoj plísní apod. Spolehlivým prostředkem proti takovým jevům je vynucený pohyb a promíchání vzduchem obsahujícím potřebný podíl čerstvého vzduchu. Účelné proudění a promíšení vzduchu přitom prakticky zabezpečí možnost měřit vlastnosti vzduchu v jednom místě prostoru a zajistit tak pro variantní výzdobu v různých místech prostoru přibližně shodné podmínky.
- Změny stavu upravovaného vzduchu v interiéru v čase je nutno chápat jako samostatný faktor. Kolísání a rychlé časové změny nikdy nesvědčí chráněným objektům. Hmotnost předmětů, jimž úprava vzduchu slouží, rozhoduje totiž o teplotním a vlhkostním přizpůsobení okolí, a to pokud možno v celé jejich hmotě. To ovšem při rychlých změnách stavu okolí není možné. Proto také je třeba velmi



Obr. 7 Sorpční izotermy dřeva (dle [2] s extrapolací 5/30 °C)

pečlivě vážit volbu výkonu zařízení, kterého bude k úpravě vzduchu užito (a to nejen s ohledem na jeho velikost a spotřebu energie), spolu s účelným systémem „konzervativního“ řízení procesu úpravy a s režimem jakéhokoli využívání interiéru (návštěvní provoz, údržba apod.).

- Další složky upravovaného vzduchu – nejen vlhkost. Z nich je závažný prach a aerosoly, jejichž usazování na chráněných předmětech je nepřijatelné (nesnadná údržba, která k nim není nikdy neutrální). Mimoto jsou to možní nositelé infekce plísněmi, houbami aj. a filtrace vzduchu je tedy prakticky vždy nutná. Nelze opominout ani plynné složky (oxidy vytvářející s vlhkostí kyselé prostředí), organické páry a aerosoly z topenišť a motorů vozidel (a jejich kondenzáty), o nichž není nikdy dost informací. Spolu s filtry zde, přinejmenším s pozitivním efektem, působí film kondenzátu vzdušné vlhkosti na povrchu odvlhčujícího chladiče klimatického zařízení.

Důležitý význam mají také faktory dané dalšími vlastnostmi stavební konstrukce a prvků interiéru, faktory podmíněné projektovým záměrem a očekávaným typem zařízení pro úpravu vzduchu a jeho řídicího systému, a další, dané okolím a posláním objektu [3]. Zde je možno jmenovat:

- Materiály skládající vrstvy stěn a zdí, stropů a podlah, využitelné nebo nevhodné průduchy a šachty, okna a okenní výklenky, ohledy na jejich fyzikální vlastnosti a jejich působení v záměru úpravy vzduchu (např. kondenzace vlhkosti na oknech) a ohledy na jejich ochranu.

- ❑ Záměry úprav stavební konstrukce spojené s projektem řešení ochrany památky a ohled na s tím spojené práce.
- ❑ Faktory, závislémi na záměru jaký způsob a rozsah úpravy vzduchu bude použit, jsou především: nároky na potřebu energie a její zdroje, využití možností jejich úspor (rekupera-ce tepla, požární bezpečnost a systém řízení a monitoringu provozu), hlučnost a vhodné umístění zařízení aj.
- ❑ Souhrn ostatních vlivů spojených s okolím a umístěním památkového objektu. Zde je, s ohledem na úpravu vzduchu, třeba respektovat místní klimatické podmínky ovlivněné kraji-nou (les, vodní plochy, proudění vzduchu atd.).
- ❑ Předpokládaný režim využívání objektu a jeho údržby, úklidu a mimosezonních úprav.

Zcela dominantní význam má ovšem rozsah a kva-lita informací souvisejících s uvedenými faktory, zku-šenost a schopnost přiměřené anticipace stavů, potřeb a rizik spojených s ochranou památky jak před nepříznivými vlivy, tak s využitím příznivých či-nitelů, stavů a okolností. Rozhodnutí vedoucí k ře-šení se tak stává dosti závislým na nákladech na přípravné práce výzkumného charakteru a na spo-lehlivosti jejich výsledků.

UPLATNĚNÍ HLAVNÍCH ČINITELŮ V REALIZACI

Vyjmenované faktory umožňují orientaci v postu-pech které musí respektovat předběžnou opatr-nost, předvídat a upřednostnit prevenci. Tehdy po-vedou k úspěchu v zabezpečení příznivého mikro-klimatu v interiérech památek. Vyžaduje to ovšem rozvedení těchto postupů do vhodného návrhu s využitím všech možností poskytovaných přírodní-mi zákony a inženýrskou praxí.

S ohledem na rozsah příspěvku to v následujícím výčtu stručně naznačíme, aniž by byla omezena in-formace o konkrétním využití diskutovaných postu-pů a o zkušenostech z řešení úpravy vzduchu v Kapli Sv. Kříže na Karlštejně.

Hmotnost stavební konstrukce doložená v obr. 1 vede k těmto jednoznačným závěrům:

- ❑ v interiéru Kaple není účelné udržovat „galerij-ní“ prostředí stálé teploty a relativní vlhkosti. Je to dáno neúměrnými energetickými nároky a dlouhou dobou k jeho nastolení (u vychladlé Velké Věže lze očekávat několik měsíců, o po-měrech při chlazení v létě nemluvě). To souvisí s vlhkostí venkovního vzduchu, která nesmí do tohoto prostředí proniknout. Přibližný obraz o energetických nárocích poskytlo řešení rov-nice tepelné bilance a v ní položka akumulova-

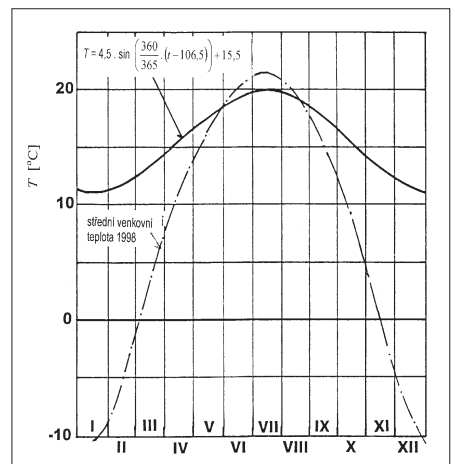
ného tepla ve zdivu, vyjádřená rovnicí nesta-cionárního vedení tepla

$$\rho \cdot c \cdot \partial T / \partial t = \text{div} (\lambda \cdot \text{grad } T) \quad (1)$$

s pečlivě uváženými okrajovými podmínkami. V nich bývá obvykle potřeba vhodně volit ze-jména součinitel přestupu tepla z interiéru. To je ovšem do značné míry ulehčeno dobrým ná-vrhem nuceného prouděním vzduchu. O přibli-žení tohoto, námi užitého modelu ke skuteč-nosti rozhoduje samozřejmě znalost nebo uvá-žený (např. po řešení s variantní volbou) odhad látkových funkcí v rov. (1).

- ❑ Pouhé vyhřívání (temperace) resp. vytápění in-teriéru nezaručí celoročně vhodnou vlhkost, speciálně vůči všem povrchům (zimní kondenza-ce na oknech, povrchy na různých hmotných prv-cích interiéru apod.). Dokládá to (v případě řešení Kaple Sv. Kříže a Kostela P. Marie pás-mo vhodné relativní vlhkosti vyznačené žlutě v obr. 1 resp. 2. Z nich je zřejmé, kolik dní v roce by vzduch (pokud by neupraven pronikal zvenku do interiéru) nevyhovoval potřebám ochrany výzdoby. Analogická studie s cílem posoudit možnosti poskytované vyhříváním prostoru musí ovšem, pokud by byla dělána, vycházet ze zachovací veličiny pronikajícího vzduchu, již je, jak bylo již řečeno, jeho měrná vlhkost;

- ❑ Interiér potřebuje přiměřeně intenzivní nucené proudění vzduchu. To překonává tepelný vliv zdiva v mikroprostorech (např. za obrazy a ná-bytkem) a v tzv. „mrtvých“ koutech. Zeslabuje na jedné straně teplotně dishomogenizující vli-vy oken a účinek samovolné teplotní konvekce (od zdí, stropu a podlahy), na druhé straně pak podporuje transportní procesy. Ty vyrovnávají pole teploty a vlhkosti jak v prostoru, tak v hmo-tě jeho stěn a mobiliáře. Účinek transportních procesů tepla a vlhkosti je ovšem nutno podpo-řit i tím, že přístup vhodně distribuovaného proudícího vzduchu do kritických míst usnad-níme. Jako příklad lze uvést účinné zavětrání rubu obrazů v Kapli Sv. Kříže úpravou jejich ukládacího roštu a odsazením ozdobných lišt.
- ❑ Proudění navíc přispívá k spolehlivosti regu-lace s minimálním počtem čidel v interiéru (v Kapli Sv. Kříže bylo v prostoru užito jediné $T - \varphi$ čidlo). Jejich instalace v historických in-teriérech bývá většinou nevídaná nebo neža-doucí.
- ❑ Místo vnuceného „galerijního“ prostředí je nut-né požadovanou teplotu interiéru přizpůsobit teplo akumulující masivní stavební konstruk-ci, což je první zásadní krok naší metody řeše-ní. Toho se dosáhne vhodnou volbou roční křivky požadované teploty. Tato křivka bude probíhat „v blízkosti“ křivky, kterou bychom



Obr. 8 Roční křivka teploty Kaple pro zimu 2000/2001 v porovnání s roční křivkou průměrných teplot 1998
t – pořadové číslo dne v roce

zjistili v interiéru nevytápěné stavby. Tato velmi cenná informace byla od r. 1997 do 1999 v pří-padě Kaple po ruce, (viz např. obr. 1) a nalezla využití v roční křivce (obr. 8) navržené jako si-nusovka

$$T = A \cdot \sin [k_d \cdot (t - B)] + C \quad (2)$$

kde t je pořadové číslo dne v roce,
 $k_d = 360/365$ pro argument sinu ve ° (= deg).

Její parametry A, B, C budou v řídicím algorit-mu Kaple nastavitelné pro účely postupné opti-malizace parametrů úpravy vzduchu. Je zřej-mé, že takový průběh zabezpečí v interiéru ne-patrné změny teploty ze dne na den.

Teplotní křivka se osvědčila jako mocný ná-stroj nejen pro ovládnutí spotřeby energie s ohledem na sezónní provoz návštěv. Její vý-hody se projeví také při návrhu algoritmu ří-zení. Bylo to v souvislosti s oddělením vlhčení a odvlhčování, omezením chlazení v zimním období, s využitím omezení výparné teploty proti zamrznutí výparníku a zejména se snad-ným testem vlivu teploty a relativní vlhkosti upraveného vzduchu na rovnovážnou vlhkost materiálů výzdoby.

Otázka vlhkosti vzduchu v interiéru řešená v kontextu s jeho roční teplotní křivkou:

- ❑ vhodné (ne však nevyhnutelné!) je řídit relativ-ní vlhkost vzduchu v Kapli (výhoda čidla φ). Její závislost na teplotě však vyvolává nutnost vyhovět požadavku udržení rovnovážné vlh-kosti u^* materiálů chráněných předmětů ve vhodných mezích, což lze označit za druhý zá-sadní bod metody řešení [4], [5]. Rovnováhu v u^* lze při pomalých změnách teploty dle navr-žené roční křivky dobře splnit a hodnotu u^* souhrnou teploty a relativní vlhkostí řídit („vlek“

$\varphi = \varphi(T)$. Závislost T vs φ bude ovšem dána kompromisní volbou;

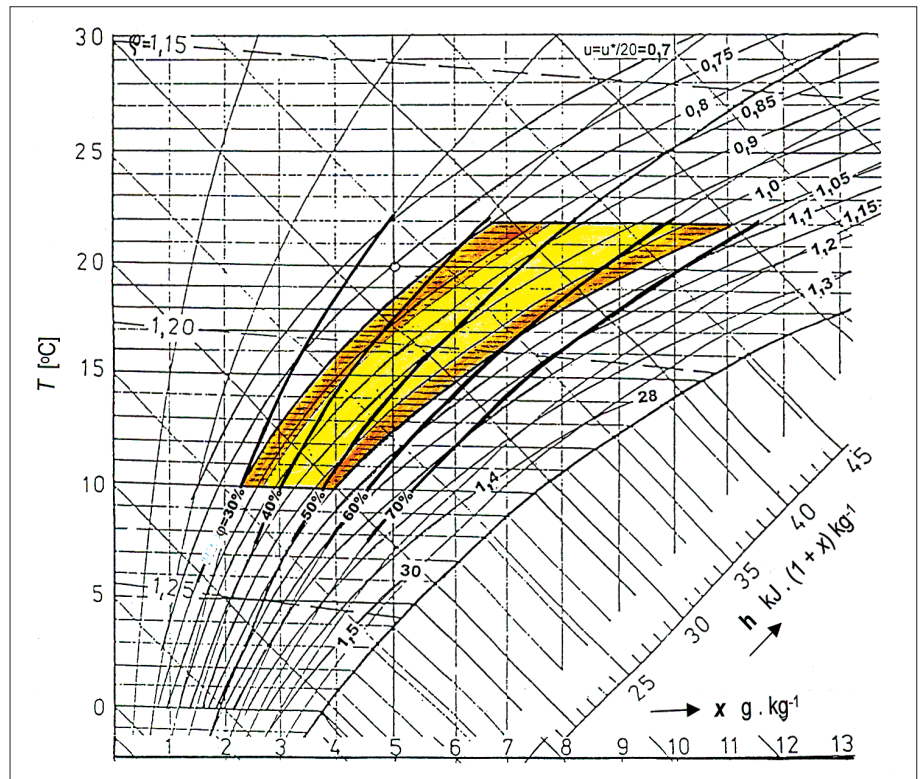
- s ohledem na toto nutně kompromisní řešení vyvolané materiálovou různorodostí chráněné výzdoby je výhodné využít vlastností sorpčních izoterem pro tyto konkrétní nebo jim blízké materiály. Řada z nich má velmi výhodný průběh. V okolí relativní vlhkosti 55 až 65 % se nachází inflexní body izoterem a přibližné splnění geometrické podobnosti (na svazku paprsků) dá názorný pohled na naději splnit úzké pásmo proměnnosti hodnoty u^* vyjádřené poměrem $\Delta u^*/u^*$;
- závažným bodem rozhodnutí byla šíře pásma. Udržování jedné požadované hodnoty u^* a příliš úzkého pásma Δu^* i jemu a teplotě odpovídající relativní vlhkosti $\Delta \varphi$ v interiéru může ideálně vyhovovat pouze jednomu materiálu, zatímco jiné materiály výzdoby při dlouhodobém působení poškodí. Rozumné je tedy připustit přiměřené kolísání požadovaných ukazatelů vlhkosti a jejich co nejmenších časových změn;
- pro praktickou potřebu určení výkonu zařízení a pro jeho řízení bylo třeba pro sorpční izotermy zúčastněných materiálů vybrat reprezentanta – rodinu izoterem pro rozmezí teplot roční teplotní křivky v interiéru. Ten pak plní testovací funkci prakticky pro všechny materiály výzdoby. Z uvedených nejistot a řady dalších pochopitelných důvodů byla hledána cesta minimálního vlivu vlhkosti vzduchu na soubor výzdoby Kaple a jako testovací materiál jsme pro řešení zvolili dřevo (obr. 7). Splňuje podle našeho názoru uspokojivě požadavky zmíněné v předešlém odstavci i s ohledem na průběh sorpčních izoterem klišu, dřevoviny, želatiny a řady dalších organických materiálů (obr. 6) a nehrozí riziky, spojenými s jinými přístupy.

V případě Kaple byl preferován ohled na dilataci dřevěných desek obrazů kolísající vlhkostí okolí. Ovšem dřevo desek obrazů i jejich podkladních a výtužných trámů může vykazovat (vlivem původu, stáří, napouštěcích prostředků z oprav atd.) odlišné vlastnosti. K jejich průkazu chybí výzkumem získané údaje (dřevo všech 129 obrazů zřejmě nemá shodné vlastnosti) a užití izotermy nevyjadřují zcela přesně ohled na chování v různých dobách různě opravované malby a jejího podkladu, o ohledu na zlacení nemluvě.

- Soubor zvolené „rodiny“ byl aproximován vztahem pro základní závislost řídicího algoritmu („vlek“ $\varphi(T)$)

$$\varphi = (a_u \cdot u^* - b_u) \cdot (T + c_u) \quad (3)$$

zjednodušeným pro naši potřebu na



Obr. 9 Zvolená pásma závislosti relativní vlhkosti na teplotě v interiéru Kaple
Žlutá – vnitřní, oranžová – vnější toleranční pásmo

$$\varphi(\%) = (1,1 \text{ až } 1,4) \cdot (T + 26,4) \quad (3a)$$

vyhovujícím pro rozsah $T \in (5; 24)^\circ\text{C}$ s chybou do 3 %.

Pro názornost budiž uvedena hodnota u^* rovnovážné vlhkosti dřeva z obr. 7 odpovídající podle námi užitě aproximace „galerijnímu“ stavu vzduchu $T = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$, která činí $u^* = 19,85 \text{ (g.kg}^{-1}\text{)}$. Jako referenční a testovací parametr jsme užíli bezrozměrný poměr $u = u^*/20$, jehož síť v rozsahu $u \in (0,7; 1,5)$ je doplněna v h - x diagramu v obr. 9. Z něho lze pro „galerijní“ hodnotu $u^* = 19,85$ tj. $u \equiv 1$ nalézt žádoucí relativní vlhkost vzduchu v interiéru při teplotách $T \neq 20^\circ\text{C}$. Například při 10°C je stavu v galerii ekvivalentní relativní vlhkost $\varphi \sim 48\%$, naproti tomu při 24°C je to $\varphi \sim 64\%$.

Jak volba hodnoty u^* , resp. u a jejich mezí, tak výběr testovací „rodiny“ sorpčních izoterem mohou být (po zkušenostech nebo dalším výzkumu a sledování stavu výzdoby) dále zlepšovány.

Zde zdánlivě preferovaný ohled na teplotu a „vlek“ $\varphi(T)$ rozhodně nevyklučuje význam vlhkostní bilance. Věnovat se zde její bilanční rovnici však s ohledem na rozsah příspěvku nelze. Zacházelo by to do náročné oblasti nestacionárního popisu přenosu vlhkosti difúzními rovnicemi. Pro ně chybí látkové funkce jejichž určení mj. vyžaduje experimenty s materiály konkrétní výzdoby.

Čistota vzduchu

Ohled na čistotu upraveného vzduchu, zvláště pak prach a aerosoly, je pro ochranu interiéru nezbytný a v důsledcích vyloučí rizika poškození památky při čištění a údržbě. Je nutno očekávat, že zanesený filtr snížením průtok vzduchu ovlivní parametry upraveného vzduchu vázané roční křivkou požadované teploty.

Pozornost si zaslouží také reakce systému na některé omezující podmínky užitě v řídicím algoritmu. Na zanesení filtru je např. citlivá ochrana vůči přiblížení stavu upraveného vzduchu k teplotě rosného bodu vybraných chladných povrchů v interiéru a omezení rozdílu mezi teplotami přiváděného a zpětného vzduchu (k ochraně výzdoby v blízkosti přívodu).

Obojí obsahuje algoritmus [7] konkrétně použitý v Kapli.

Konstrukční faktory a jejich uplatnění v řešení systému Kaple byly zčásti zmíněny v předešlých odstavcích. Z těch, které nyní zbývají, zaslouží pozornost především:

- rekuperace latentní složky entalpie upravovaného vzduchu, významná při odvlhčování vzduchu chlazením. Účelná je rekuperace části latentního tepla děleným kondenzátem chla-

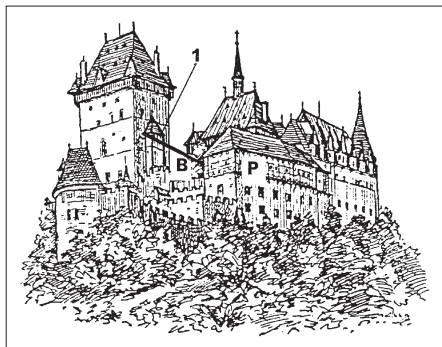
diva. Rekuperuje se část kondenzačního tepla chladiva, v dílu kondenzátoru vestavěném do jednotky. Druhý díl kondenzátoru odvádí přebytek kondenzačního tepla a ztráty kompresoru do prostoru vně jednotky a jeho řízení akce zajistí rekuperativní ohřátí vzduchu pouze na stejnou teplotu před a za vestavěným dílem (tj. rekuperuje se pouze „citelná“ část entalpie chlazením odvlhčovaného vzduchu).

- požární bezpečnost. Příslušné vybavení (protipožární klapky, signalizace aj.) se může doplnit souhrnou s řídicím systémem a monitoringem (tepelná ochrana motoru ventilátoru, omezení pracovní teploty el.ohříváče, uzavření směšovacích klapek apod.);
- koncepce systému se v provozu projeví specifickými nároky na údržbu. I přiměřeně zvolený výkon zařízení si může vyžádat zvláštní dohled při poruchách nebo extrémních klimatických situacích, které nejsou nikdy předem vyloučeny.

K této části je možno souhrnně konstatovat, že sice v úvahách zdůrazňuje důležitost fyzikálních zákonů, avšak spíše než na přesnost výpočtových modelů se soustřeďuje na fyzikálně správný a racionálně zajištěný výpočtový odhad.

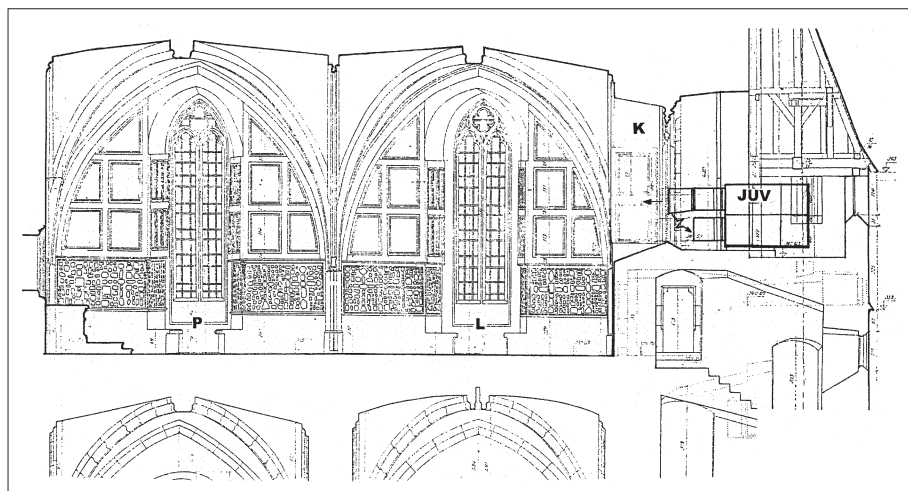
ZAŘÍZENÍ V KAPLI SV. KŘÍŽE

Význam předchozích úvah a z nich vycházejících zásad nejlépe přiblíží stručný popis realizace systému úpravy vzduchu v Kapli Sv. Kříže na hradě Karlštejn. Po úvahách nad několika variantami umístění a typu zařízení byla ve spolupráci se správou hradu a pracovníky památkových ústavů zvolena kompaktní jednotka [6] umístěná pod krůvkem (obr. 10, ozn. 1) schodiště přiléhajícího k masivu Velké Věže. Výšková dispozice je patrná z obr. 11 na němž je svislý podélný řez lodí (L) a presbyteriem (P) Kaple, s příčkou vytvářející – mezi oknem a vstupem zpětného vzduchu do jednotky – směšovací komoru (K). Kontura jednotky (JUV) za gotickým oknem nad vchodem je silně vytažena. Z obr. 10 je patrný bezdrátový přenos (B) dat do



Obr. 10 Situace systému

1 – krůvka schodiště, B – bezdrátové spojení jednotky s počítačem, P – místnost v purkrabství



Obr. 11 Podélný řez Kaplí, výšková situace

kanceláře v purkrabství (P) k počítači celého systému. Ten zároveň integruje již dříve instalovaný monitoring ostatních míst hradu.

Podlaha podkroví je o 2,9 m výše než podlaha Kaple, takže výstup upraveného vzduchu otevřeným levým křídlem druhého svislého pole okna, prakticky v podélné ose Kaple je dostatečně vysoko nad hlavami návštěvníků.

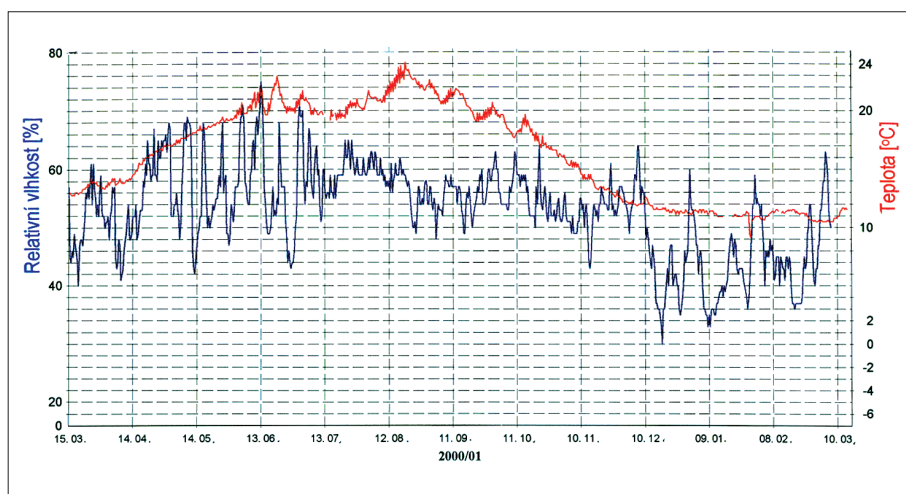
Vstup zpětného vzduchu do směšovací komory je otevřeným, bezprostředně sousedícím pravým křídlem okna, přes vlhčící jednotky Defensor umístěné v této komoře. Kinetická energie výstupu zabezpečuje, že před oknem nedochází k podstatnému směšování, v řídicím algoritmu je však pamatováno na omezení rozdílu teplot mezi přiváděným a zpětným vzduchem, k ochraně Theodorikových obrazů ve výklenku tohoto okna.

Vzduchový výkon jednotky zabezpečil velmi dobrou teplotní i vlhkoštinu homogenizaci vzduchu v prostoru Kaple, jejíž objem je necelých 1000 m³ při půdorysné ploše cca 125 m². Tepelný a chladičový výkon byl určen jednak s ohledem na ztráty resp. zisky tepla třemi jednoduchými gotickými okny, jednak potřebou uvést (v režimu teplotního přizpůsobení) interiér Kaple během prvních 3 měsíců roku 2000 na stav vhodný k instalaci deskových obrazů, což jednotka splnila. Je to patrné ze záznamu teploty a relativní vlhkosti na obr. 12, z nějž lze identifikovat období „přizpůsobení“ a po něm následující instalaci obrazů a provoz. Pro něj byly dosud autonomně působící vlhčící jednotky přeneseny z prostoru Kaple a začleněny do automaticky řízeného systému JUV. Zároveň byla „přizpůsobovací“ roční teplotní křivka interiéru převedena na parametry odpovídající prvním záměrům trvalého provozu s tím, že bude po několika měsících podle zkušeností jemně přizpůsobována reakci systému Kaple-JUV. K tomu došlo až v listopadu se záměrem zjednodušit algoritmus řízení (šlo pouze o omezení spotřeby destilované vody pro zimní

vlhčení). Přitom zkušeností z velmi příznivé reakce systému na mimořádné letní extrémní venkovní měřené vlhkosti bude využito k přestavení řídicích parametrů pro celý rok a k drobným dohodnutým optimalizačním úpravám. Průběh zimy 2000/2001, během které byly monitorovány noční venkovní teploty (až -15 °C), nevedl k potřebě měnit teplotní křivku a parametry algoritmu nastavené v listopadu.

Schéma sestavy [6] agregátů jednotky je patrné z obr. 13, kde stojí za pozornost kondenzátor kompresorového chladičového agregátu s dělenou funkcí (do skříně jednotky vestavěný díl K1). Uspořádání, které vzhledem ke konkrétním podmínkám Kaple během roku zkusíme, slouží k úspoře elektrické energie. Jde o rekuperaci části tepla z vlhkosti vzduchu (a jež pochází především z nutně přiváděného venkovního vzduchu), která zkonduzovala na výparníku. Vnější díl K2 je s kompresorem umístěn v podkroví, před příčkou směšovací komory, kde je chlazen venkovním vzduchem pronikajícím sem ozdobnými otvory v okenicích (okna zde nejsou) a krytinou. Odtud také jednotka řízeně nasává 0 až 20 % čerstvého vzduchu. Tím se mj. v Kapli vytváří přetlak bránící pronikání neupraveného vzduchu buď zvenku (okny – spárami v zalití jeho teploty vůči venku – střídavý komínový tah. Pro zabezpečení potřebného přetlaku bylo nutno přidaným těsněním vhodně „upravit“ netěsnost nepřiléhajících historických dveří Kaple. Součástí projektu bylo osazení malých, vhodně krytých přenosných axiálních ventilátorků působících vertikálně, jednak k intenzivnější homogenizaci vzduchu v prostoru Kaple, jednak předurčených k vyvolání konvekce v okenních výklencích zateplováných styroporovými deskami v období zimního klidu objektu. Provoz ukázal, že prvnímu účelu postačuje cirkulace vyvolaná přívodem vzduchu.

K příznivému vlivu proudění vzduchu v Kapli lze doložit následující. Vzhledem k nepatrnému rozdílu



Obr. 12 Roční graf monitorované teploty (červená) a relativní vlhkosti (modrá) v Kapli Presbyteriální klenba.

Iu teplot v Kapli mezi sousedními dny a jejímu nepatrnému kolísání vlivem regulační hystereze je zajímavý průběh relativní vlhkosti, který by mohl být zaviněn transportem vlhkosti z líce zdi, popříp. průnikem z okolí, nedostatečně vyspravenými trhlinami ve zdivu.

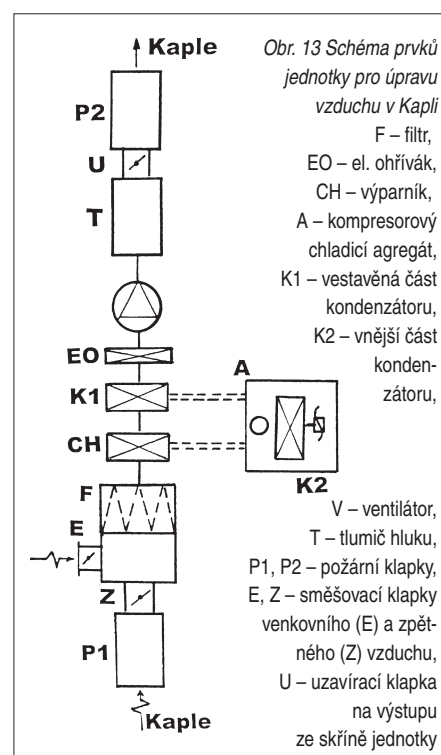
Pokud je vlhkostní stav zdiva vyrovnaný, zdivo bez statických defektů a relativní vlhkost v interiéru podstatně nekolísá, není důvod k jejímu kolísání ani v souvisejících mikroprostorech. Svědčí o tom např. tříhodinový záznam relativních vlhkostí venkovního (RV3), upraveného přiváděného (RV5) a zpětného (RV4) vzduchu v obr. 14 vzaty dne 15. 3. 2001 ze záznamů sběru dat jednotky. V něm jsou integrovány také tři průběhy relativní vlhkosti v mikroprostorech za obrazy, o jejichž způsobu zavětrání již byla zmínka. Soustřeďují se s RV4 ve středním pásmu, pod nimi je čára RV5, nahoře venkovní RV3. Jen pro úplnost poukážme na „špičky“ vyvolané krátkodobými, zatím z různých racionálních důvodů ponechanými externími poruchami v bezdrátové komunikaci do počítače, popř. – po 11.34 h – kontrolní manipulací na řídicím systému.

Jako názorná ukázka informativní hodnoty grafických průběhů jsou uvedeny záznamy z monitoringu [1] v obr. 15 a 16, z nichž je kromě stavů (čáry T0, RV0 v obr. 15) za „ostře sledovaným“ obrazem v západním okenním výklenku presbyteria Kaple a stavů TK, RVK (pod klenbou) a TM, RVM (stěna u mříže, 80cm nad dlažbou) patrný nečekaný výpadek funkce velmi spolehlivých vlhčících přístrojů. Je od 3. 2. do 6. 2. doložen bezprostřední závislost relativní vlhkosti v Kapli v obr. 15 na poklesu měrné, na objem vztažené, vlhkosti – modrá čára v obr. 16. Tehdy jednotka nestačila přivíráním venkovního vzduchu zabránit úbytku vlhkosti. Vlhkost vzduchu pod klenbou však podle obr. 10 nevybočila z krajních přípustných mezí. Po opakování téhož jevu (po 23. 2.) byla zjištěna příčina v přívodu vody.

ZÁVĚR

Pro ovzduší neobývaného interiéru památkových objektů s velmi hmotnou stavební konstrukcí je vhodná roční teplotní křivka v podstatě jedinou alternativou k prakticky nedosažitelnému požadavku „galerijního“ prostředí s řízeným úzkým pásmem kolem konstantní teploty a relativní vlhkosti. Dominantní roli zde ovšem sehrála skutečnost, že teplotní a vlhkostní stav prázdné Kaple byl od konce r. 1997 průběžně monitorován [1] a bylo z čeho vycházet.

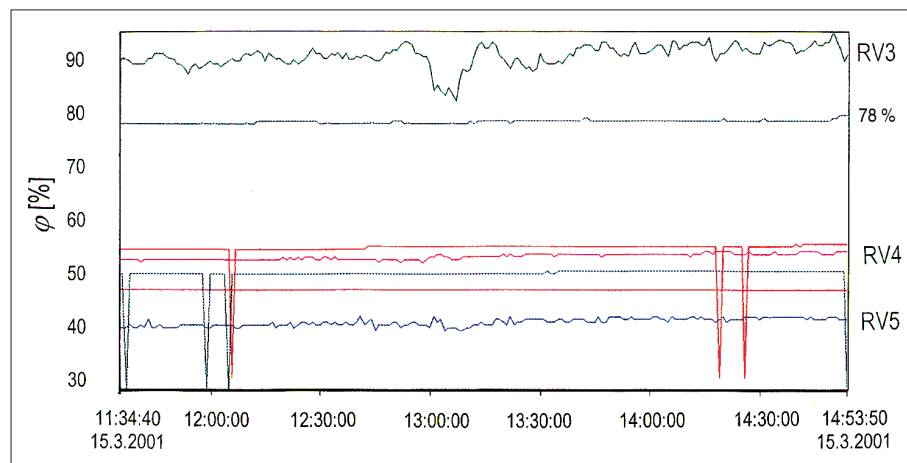
Volba vhodné roční teplotní křivky pro interiér určitého objektu si však vyžádala přizpůsobení relativní vlhkosti vzduchu k této měnící se teplotě. Zatím jediným kvantifikujícím prostředkem k určení této závislosti byly sorpční izotermy vyjadřující teplotně vlhkostní (termodynamickou) rovnováhu mezi vlhkým vzduchem a materiály v interiéru. Volba sorpčních izoterm dřeva jako testovacích vycházela ze zjištění ukázaných v obr. 6 a 7. Přístup



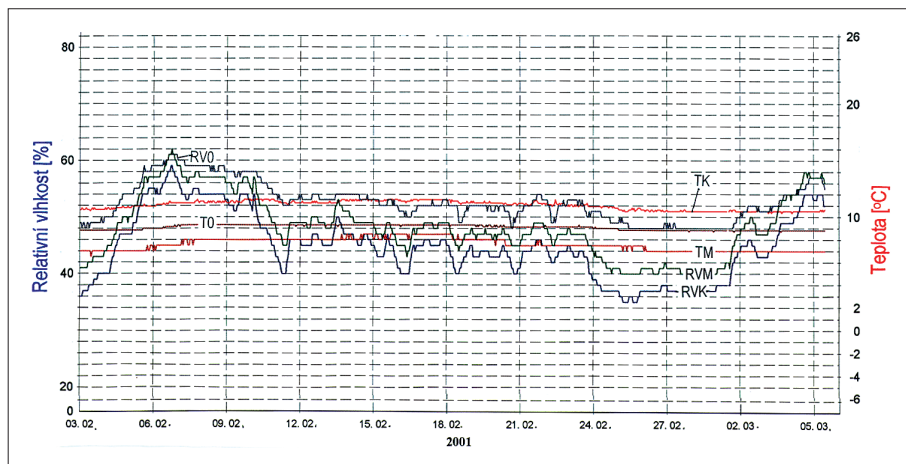
je oprávněný mj. proto, že průběh teploty podle teplotní křivky v měřítku denní změny je prakticky konstantní (řádu 0,1 K · den⁻¹).

Toho bylo využito k vytvoření objektivní metody řešení tvorby a podpory mikroklimatu v interiéru. S tím, že jeho parametry budou upravovány podle systematického sledování a výzkumu vývoje stavu výzdoby. Tato zpětná vazba je významnou součástí celé akce ochrany Kaple.

V prvním návrhu to vedlo v Kapli Sv.Kříže na Karlštejně k instalaci poměrně malé a výkonově úsporné a automatickým řízením a sběrem dat vybavené jednotky pro celoroční úpravu vzduchu.



Obr. 14 Záznam relativní vlhkosti RV5 – vzduch přiváděný do Kaple, RV4 – zpětný vzduch, v jejich okolí relativní vlhkosti v mikroprostorech za obrazy, RV3 – venkovní vzduch, vzduch ve schodišti (78 %)



Obr. 15 Ukázka záznamu teploty a vlhkosti ve třech místech Kaple

Presbyteriální klenba. K – pod klenbou, M – u mříže u východní stěny, 0,8 m nad dlažbou, O – mikroprostor za obrazem ve výklenku západního okna presbyteria

Kapli Sv. Kříže považuje správa státního hradu Karlštejn za objekt hodný dlouhodobé pozornosti z hlediska působení řízeného mikroklimatu na její celkový stav. Jakkoli je preference ochrany Theodorikových obrazů mimo diskusi, stále zůstává skutečností, přes veškerou předběžnou opatrnost, že volba a dodržení parametrů (například s ohledem na výkyvy počasí viz [4, 5]) upravovaného vzduchu byla a vždy bude (ovšem oprávněným) kompromisem. Obě tyto skutečnosti orientují nejbližší budoucnost provozu systému na zmíněnou zpětnou vazbu, spočívající v soustavném dohledu restaurátora na stav výzdoby ve spojení s postupnou úpravou nastavení funkce jednotky k nalezení „ideálních“ parametrů mikroklimatu Kaple.

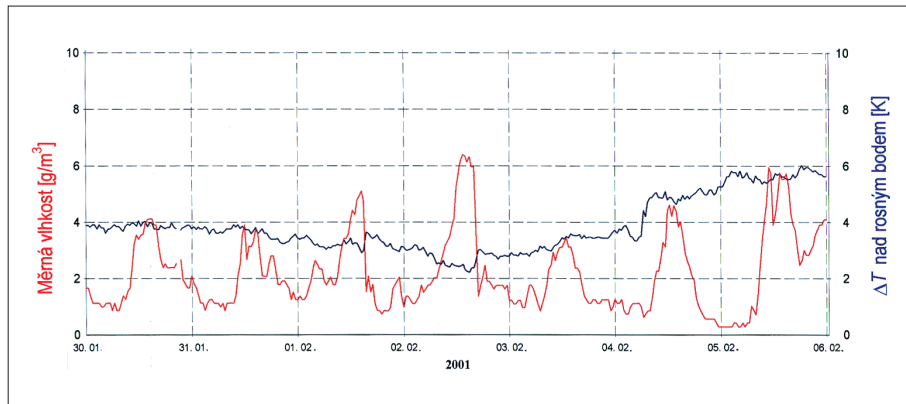
Popis náročného problému by zůstal na půli cesty, kdybychom nepřipomněli zodpovědnost vůči stavu výzdoby Kaple, která nás zprvu, v průběhu řešení nutila každý krok prověřovat fyzikálními zákony a každé rozhodnutí vážit ze všech, i nefyzikálních hledisek, jak se jistě přesvědčí návštěvník Kaple.

Úzkostlivý dohled na dodržení přijatých parametrů funkce zařízení po uvedení jednotky do provozu

(s významným využitím systému monitoringu [1] teploty a vlhkosti hradu) tak bylo možno postupně zúžit na občasně ujistění o dobré stabilitě systému. Řada preventivně zaměřených obav z mnoha teoreticky možných neočekávaných projevů a vlivů se tak postupně zredukovala na potřebu sledování reakce systému na extrémní stavy venku. Nema-lou zásluhu na tom mají dodavatelé jednotky a jejího řídicího systému [6, 7] s monitoringem stavů vzduchu a funkcí všech agregátů jednotky. Věříme, že jim v invenci zbylo dosti prostoru jak k popisu zajímavých řešení užitých v popsaném náročném projektu, tak zejména k dalšímu zdokonalení systému Kaple a využití získaných zkušeností v jiných památkových objektech v některém z dalších příspěvků.

V tomto ohledu zbývá již jen poukaz na několik otázek, které řešení popsaného problému vyvolalo a které by se měly v budoucnu stát neopomíjenou součástí činnosti při péči o památkový objekt.

- Fyzikální zákony mají nezastupitelný význam a je na místě je maximálně využít. Hrají totiž roli nejen při úvahách jak vyhovět materiálové rozmanitosti výzdoby, ale i při rozhodování



Obr. 16 Záznam objemové měrné vlhkosti (modrá) a rozdílu teploty k rosnému bodu (červená) venkovního vzduchu

o umístění zařízení nepoškozujícího a nenarušujícího historické prostředí.

- Před stanovením způsobu úpravy vzduchu je nutný soustavný, alespoň 1 roční monitoring teploty a vlhkosti v interiéru i okolí objektu a správná interpretace jeho výsledků s ohledem na vliv okolí (pronikání venkovního vzduchu, vztlínající vlhkost, orientace a umístění objektu, vítr aj.) a vliv provozu a lidské činnosti. Jsou to náročné činnosti vyžadující rozhled, kvalifikaci a zkušenost.
- I nejjednodušší způsoby úpravy vzduchu a jeho provoz (temperování, vytápění, využití příznivých stavů venkovního vzduchu k větrání okny apod.) se neobejde bez průběžného měření s řízením příslušných veličin. Zpracování měřených veličin počítačem je nutné. Je také třeba pečlivě zvážit, zda řídicí činnosti může za nových okolností splnit člověk.

- Systémy automatického řízení poskytují pro zpětnou vazbu obvykle velké množství informací, jejichž zpracování je možné pouze počítačem. Jejich rozsah a možnost využití souvisí s cenou systému sběru a zpracování dat. Je třeba zvažovat účelnost lokálního systému měření a řízení v kontextu celého objektu.

- Úprava vzduchu v interiéru vždy ovlivní okolní prostory a vyvolá otázky, které bude nutno řešit.

Závěrem autoři děkují všem spolupracovníkům z Památkového ústavu středních Čech, Správy státního hradu Karlštejn, dodavatelům jednotky a projektantům a dodavatelům ostatních prací. Pomohli nám mnohdy cennou radou a názorem aniž si to uvědomili.

Snímek kaple byl zapůjčen laskavostí správy st. hradu Karlštejn.

Literatura:

- [1] Tech.-Rentals CS, spol. s r. o.: Technická informace – doplněk, Brno, 28. 7. 1998
- [2] ZVONÍČEK, J.: Sušárny, Skripta ČVUT, Fakulta strojí, Edič. střed. ČVUT, 1969
- [3] PAPEŽ, K., JELÍNEK, V., MARTINÁSKOVÁ, M., ZÍTEK, P.: Projekt úpravy mikroklimatu, Praha, 4/1999
- [4] NĚMEČEK, M., MARTINÁSKOVÁ, M.: Úprava mikroklimatu v Kapli Sv. Kříže státního hradu Karlštejn (zpráva o měření – 1. etapa provozu), Praha, 6/2000
- [5] NĚMEČEK, M., MARTINÁSKOVÁ, M.: Úprava mikroklimatu v Kapli Sv. Kříže státního hradu Karlštejn. Závěrečná zpráva za r. 2000, Praha 12/2000
- [6] KLAZAR, L., (PZP KOMPLET, s. r. o.): Jednotka úpravy vzduchu pro kapli Svatého kříže, Dobruška, 11. 11. 1999
- [7] SLÁDEK, O., (PROTECO, s. r. o.): Návrh na používání programu pro obsluhu klimatizační jednotky v kapli Sv. Kříže, Pardubice, 11/1999.