

Sníží proudění vlhkost vzduchu v historickém interiéru?

Does the Air Flow Decrease the Level of Moisture in Historical Interiors?

Prof. Ing. Miloslav NĚMEČEK, DrSc.
Ing. Petr BEDNÁŘ
ČVUT FEL v Praze, Fakulta
elektrotechnická, katedra
elektroenergetiky

Príspevek predstavuje princípy jednoduchého modelu ovlivnění vlhkosti předmětů v památkově cenných interiérech masivních historických staveb prouděním vzduchu. Analýza využívá kvalitativních sorpčních vlastností povrchu modelového vlhkostně aktivního materiálu a vlastností samovolné tíhové konvekce vzduchu u jeho povrchu v okolí rovnovážného stavu k rozhodnutí, kdy je nutno konvekci v interiéru ovládat umělými prostředky.

Klíčová slova: přenos tepla a hmotnosti, vysoušení, samovolné tepelné a nucené proudění

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

The article deals with some principles being of use in tasks which are aimed to decrease the content of moisture and its effects in historical interiors. A simple model including both properties of a moisture active material and experimental data of boundary layers of natural gravity buoyance has been used to prove a supplementary setting on fans and other simple artificial means to intensify the movement of interior air.

Key words: heat and mass transfer, dehumidifying of buildings, natural heat buoyancy, artificial convection

V historicky cenných stavbách bývá vlhkost povrchových ploch stavby i chráněných předmětů označována za hlavního nepřítele. Oslabení popřípadě až eliminace jejích negativních vlivů klade značné nároky na vhodné mikroklima v památkově chráněných a jinak cenných interiérech a závisí na úrovni opatření k zabezpečení příznivé teploty a vlhkosti vzduchu. Ta však nemohou přinést plný úspěch, pokud nejsou spojena s doceněním komplexní úlohy proudění vzduchu v boji s nežádoucí vlhkostí v dotčeném prostoru. Pohled na možný přenos proudění vzduchu a to i v objektech, v nichž instalace klimatizačního nebo teplovzdušného zařízení není možná, má podat tento příspěvek.

Náročnost v řešení ochrany památky před působením ovzduší spočívá na jedné straně ve znalosti činitelů daných m.j. vlastnostmi stavební konstrukce, materiálovou různorodostí stavebního řešení a cenného vybavení interiéru, dále kompromisy s požadavky památkového dohledu, záměrem a sezónností jeho využití, vztahem objektu k fyzikálním parametrům jeho okolí a v neposlední řadě vůbec možnostmi uplatnění různých, i nejjednodušších forem technického vybavení objektu. Úspěch řešení je ovšem do značné míry podmíněn zvládnutím možností, které pro aplikaci v daných podmínkách poskytují poznatky termoaerodynamiky. Poměrně nenáročnými prostředky se autoři příspěvku přesvědčili o důležitosti pohybu vzduchu, či spíše jeho definovaného proudění v každém památkově cenném interiéru. Ukázal to popis procesů výměny a přenosu tepla a hmotnosti, v kterém proudění hraje podstatnou roli a poznatky z meteorologických dat a prověřily to zkušenosti z vysoušení památkových objektů po loňských záplavách. Význam proudění při vysoušení totiž vyniká především záměnou tepelné energie za mechanickou.

Údaje uvedené níže mohou být uplatněny u řady památkových objektů, které nelze opatřit klimatizačním zařízením a které jsou buď jen sezónně vytápěny, nebo jsou nevytápěné popříp. jsou pouze omezeně temperovány proti promrzání. Proces vysoušení interiéru popřípadě částí stavební konstrukce závisí na stavech venkovního vzduchu, které je nutno sledovat a tepelné vlhkostní podmínky vysoušených povrchů jim aspoň v minimální míře přizpůsobit. Hnacími silami procesu vysoušení tedy budou především nebo pouze „přirozené“ nebo jen málo uměle ovlivňované rozdíly mezi teplotami venku a uvnitř, ovšem s tím, že cílem je suboptimální výsledek, tj. připouští se v roce určitý počet dnů, kdy vysoušecí proces nemůže probíhat.

1. METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY

Úspěšné využití dlouhodobého účinku proudícího vzduchu spočívá na reakci teplotně-vlhkostního stavu nevytápěného interiéru resp. neohřívávaných, k od-

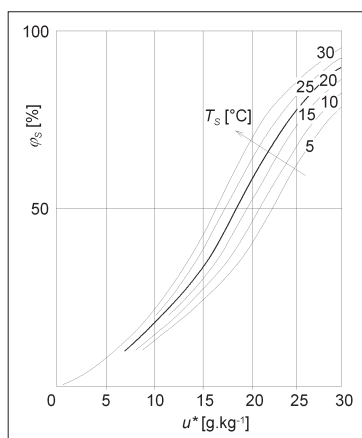
vlhčování určených částí stavební konstrukce na stav venkovního vzduchu. Jako názorný příklad z něhož lze usoudit na akumulaci tepla resp. vlhkosti v masivní stavbě může posloužit Karlštejn [6].

Podrobný popis s tím spojené analýzy meteorologických údajů a vyšetření tepelné nebo vlhkostní akumulace objektu, které předcházejí rozhodnutí o požadovaném celoročním teplotně-vlhkostním režimu objektu, s ohledem na rozsah příspěvku vynecháme a nahradíme ho jen stručným odkazem na následující zásady:

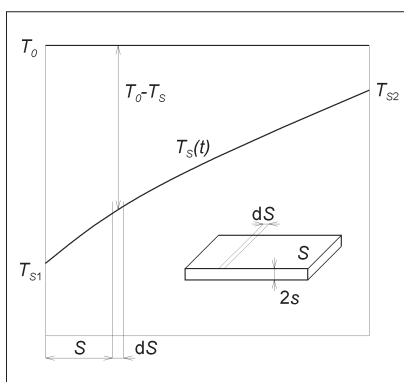
- ❑ Vysoušení je prakticky účinné pouze je-li měrná vlhkost venkovního vzduchu nižší, než měrná vlhkost vzduchu odpovídajícího stavu na vysoušeném povrchu. Venkovní vzduch se *nesmí* k vysoušení užít, je-li teplota jeho rosného bodu vyšší než teplota vysoušeného povrchu. Období, kdy se tyto stavy jen zřídka s vysokou pravděpodobností vyskytují, jsou známa z meteorologických dat, zahrnují v součtu okolo 12 dnů. Jsou to tzv. jarní krize (vlhkost teplého vlhkého venkovního vzduchu kondenzuje na prochladlých stěnách) resp. krize bouřek vrcholného léta (extrémně vlhký vzduch kondenzuje i na relativně teplém povrchu).
- ❑ V souvislosti se změnami stavu venkovního vzduchu je třeba brát v úvahu i další činitel, kterým je akumulace tepla či chladu v masivních zdech historických objektů a zpoždění s jakým stavba a teplota v interiéru reaguje na změny teploty venku.
- ❑ Vysoušecí účinek proudění vzduchu musí být spojen s přívodem (alespoň podílu) čerstvého vzduchu k vysoušenému povrchu. To, že *relativní* vlhkost venku je nižší než 100 %, neznamená však, že venkovní vzduch je použitelný. Rozhodují i teploty venku a uvnitř.
- ❑ Na rozdíl od časově zpožděné reakce teploty masivní stavby vlivem akumulace tepla reaguje vlhkost v interiéru rychleji. Měrná vlhkost vzduchu x ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{sv}}$) je totiž veličinou zachovací a i když se během dne poměrně málo mění, průnik vlhkosti zvětší se v interiéru okamžitě projeví. Někdy je ovšem nutno počítat i s případy akumulace vlhkosti (dřevěné plochy stropů, podlah, masivní mobiliář). Tomuto jevu se však opět s ohledem na rozsah nemůžeme podrobně věnovat.

2. OPRAVNĚNOST VYSOUŠENÍ NEUPRAVOVANÝM PROUDÍCÍM VZDUCHEM

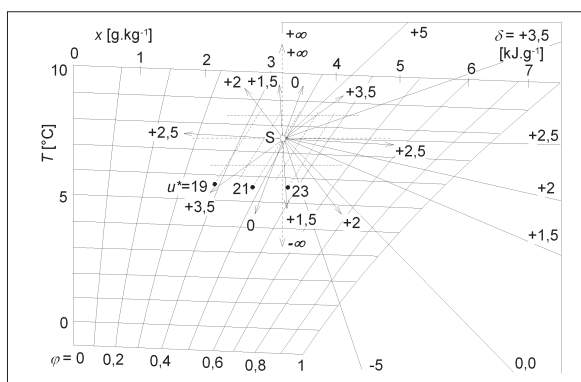
Předem byla přijata zásada, že má-li být proudění vzduchu účinné, musí být nucené. Samovolná teplotní konvekce by k tomu vyžadovala značné teplotní rozdíly, které nemusí být pro památku únosné, nejsou vždy k dispozici a byly by spojeny se značnými nároky na tepelnou energii. Při malých teplotních rozdí-



Obr. 1 Sorpční izotermy testovaného materiálu



Obr. 2 Teploty při obtékání desky vzduchem



Obr. 3 Změny stavu vzduchu u sorpčně aktivního povrchu v blízkosti sorpční rovnováhy

lech samovolná konvekce vymizí, vzduch stagnuje a vytváří mrtvé kouty, teplotní inverze (teplý „polštář“ pod stropem, studený „bazén“ u podlahy). Další podmínkou je částečná obnova vzduchu jeho přívodem zvenku.

Úloha byla pak formulována do dvou částí:

- prokázání efektu odvlhčování a vysoušení vůči vlhkosti aktivních povrchů popř. jeho podpora nuceným prouděním neupravovaného vzduchu,
- určení zásad pro návrh nucené konvekce kolem vysoušeného povrchu (výkon ventilátoru a režim proudění, jeho směr a intenzita).

2.1 Přenos tepla a hmotnosti

Pro orientaci v první části úlohy byly využity dvě stránky procesu vysoušení:

- pro mokré povrchy je relativní vlhkost vzduchu, která bývá nižší než 100 % vždy výhodná (proces vysoušení probíhá izoentalpicky, pokles teploty se hraje z čerstvého vzduchu);
- pro materiály aktivní vůči vzdušné vlhkosti (dřevo, papír, kůže, textil, malty, omítky aj.) se využije skutečnosti vyplývajících z jejich termodynamické, tj. i sorpční rovnováhy s okolním vzduchem. Ta je při pomalých procesech přibližně splněna a z charakteru sorpčních izoterm např. v obr.1 je pro každý materiál nutno vzít v úvahu jednak jev, že jeho rovnovážná měrná vlhkost u^* při stejné relativní vlhkosti okolního vzduchu stoupá s poklesem jeho teploty, jednak skutečnost, že rovnovážné měrné vlhkosti u^* vysoušeného materiálu při určité teplotě odpovídá na jeho povrchu relativní vlhkost vzduchu vždy nižší než 100 % (bod S v h - x diagramu v obr. 3).

Stav v bodě S pak figuruje v platných rovnicích (okrajových podmínkách) pro přestup tepla (1), pro přenos hmotnosti (2) a v Merkelově rovnici (3):

$$\rho_c = \alpha \cdot (T_o - T_s) = -\lambda_s \frac{\delta T_s}{\delta n} \quad (1)$$

$$m = \beta_x \cdot (x_o - x_s) = -D_u \frac{\delta u^*}{\delta n} \quad (2)$$

$$\rho_m = l_{H_2O} \cdot m \quad (2a)$$

$$\beta_x = \frac{\alpha}{c_p} \text{ (Lewisův vztah)} \quad (2b)$$

$$\rho_h = \rho_c + \rho_m \approx \beta_x \cdot (h_o - h_s) \quad (3)$$

kde ρ ($W \cdot m^{-2}$), m ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) hustoty toku výkonu a hmotnosti, $\beta_x \approx \alpha/c_p$ součinitel přenosu hmotnosti (závisí na součiniteli α přestupu tepla a tedy na rychlosti proudění), l_{H_2O} výparné teplo vody, indexy: o – vzduch v interiéru, S – stav vzduchu na povrchu S vlhkého tělesa. Ostatní značení dána v textu.

Řešení simultánně platných rovnic (1) a (2) komplikuje jednak vyjádření proměnné u^* jako funkce teploty T_o a měrné vlhkosti x_o , jednak nutnost řešit dvě parciální rovnice (energie a difuze), proto je i v nejjednodušších modelech složitá a vyplatí se pouze pro náročné případy.

Jako nejvýhodnější a názorný však pro chování vlhkého povrchu v blízkosti termodynamické a sorpční rovnováhy postačí bilanční model vlhké tenké desky (tj. se soustředěnou teplotní i vlhkostní kapacitou) obtékané vzduchem přibližně stálé teploty T_o podle obr. 2, vycházející z rovnic:

$$\alpha (T_o - T_s) dt = s \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot dT_s \quad (4a)$$

$$\beta_x (x_o - x_s) dt = s \cdot \rho_s \cdot du_s^* \quad (4b)$$

z nichž po úpravě vychází vztah významný pro další úvahy:

$$\frac{du_s^*}{dT_s} = 10^3 \cdot \frac{c_s}{10^6 \delta_s - l_{H_2O}} \quad [g \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (4)$$

kde c_s ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) měrná tepelná kapacita materiálu desky, s (m) její polotloušťka a hustota ρ_s ($kg \cdot m^{-3}$), δ_s ($kJ \cdot g^{-1}$) okrajové měřítko spojnice bodu S s bodem stavu vzduchu v interiéru, l_{H_2O} ($J \cdot kg^{-1}$) \equiv konst výparné teplo vody.

Tedy k řešení postačí h - x diagram, v němž jsou pro daný materiál vyneseny křivky $u^* = \text{konst}$.

Z úvah vychází několik praktických výsledků:

1. součinitel α přestupu tepla při samovolné konvekci vyvolané rozdílem teplot ΔT (K) je za běžných podmínek velmi nízký, (2 až $3,5 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), jak plyne např. ze vztahů

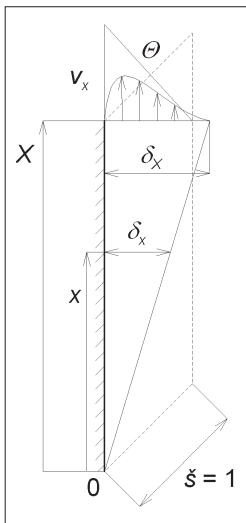
$$\alpha = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta T}{h}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{pro } Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7 \quad (4c)$$

$$\alpha = 1,63 \cdot \left(\frac{\Delta T}{h}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{pro } Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7 \quad (4d)$$

K těmto hodnotám je možno přičíst vliv sálání. Limitní hodnota α_r pro teplotu T je dána vztahem

$$\alpha_r = 0,227 \cdot \varepsilon \cdot \varphi_{1,2} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^3 \quad \text{pro } T \text{ (K)} \quad (4e)$$

z kterého pro černé těleso kolem $T \approx 273 + 10$ (K) při $\varphi_{1,2} = 1$ vychází $\alpha_r \approx 5,1 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.



Obr. 4 Schéma přirozené teplotní konvekce u topené svislé desky

součinitele α najde důvěryhodný vztah (situace při obtékání povrchů volným proudem z ventilátoru je velmi specifická).

S hlediska výměny vlhkosti pak ze vztahu (4) a z pro něj konstruovaného obr. 3, jímž je h-x diagram s vyneseními čarami $u' = \text{konst}$ podle obr. 1 plyne, že změna stavu vzduchu v bodě S nesměřuje k bodu reprezentujícímu stav okolního vzduchu v interiéru (bod I, který však zde není zvlášť značen). Vychází z bodu S směrem paprsku zakončeného šipkou, jehož směr se neshoduje se spojnicí bodu S s bodem I (paprsek s okrajovým měřítkem δ_S). Jeho číselné označení u šipky se shoduje s hodnotou okrajového měřítka δ_S , avšak další vývoj změny stavu v S ovšem závisí na vzdálenosti IS. Pokud bod I neleží v místě blízkém bodu S (podmínka termodynamické rovnováhy), změna stavu dále od S se postupně odklání od přímky.

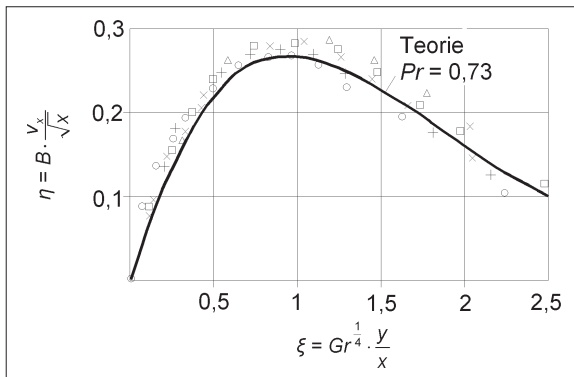
Z obr. 3 je m.j. patrné, že v sektoru cca $1,8 < \delta_S < 2,4$ směruje změna stavu povrchu S velmi „krátkou cestou“ k mezní křivce $\varphi = 100\%$, což v důsledku vede k potřebě ovlivnit stav vzduchu v interiéru buď ohřevem nebo odvlhčením.

Na druhé straně je zajímavé vyjádření proporcí mezi sdíleným citelným a latentním teplem patrné z procesů příslušných okrajovým měřítkům $\delta_S < 0$, $\delta_S > 3,5$ a dalším, při nichž vysoušecí účinek nuceně proudícího vzduchu může být i pozitivní.

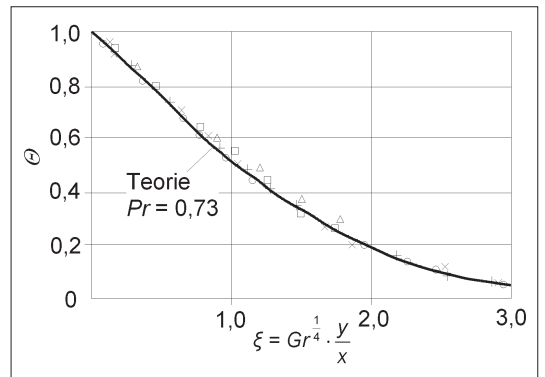
Protože nepříznivé hodnoty měrné vlhkosti se během roku v interiéru, nenecháme-li ho v chladném období vymrznout, vyskytují pouze v předjarním období a zcela výjimečně, popřípadě jsou při vynaložení nepatrného výkonu ohřevem vzduchu potlačeny, je speciálně u zdí a stavební konstrukce pravděpodobnost udržení jejich žádoucí vlhkosti velmi vysoká. Z obr. 3 z dalších počátečních směrů vysoušecích procesů odpovídajících několika jiným okrajovým měřítkům δ_S spojnic stavových bodů S a I jsou tendence různých podmínek vysoušecího procesu názorně patrné.

2.2 Volba intenzity nuceného proudění

V oblasti bez znatelné výměny vzduchu či dokonce za stagnace jeho pohybu, přestává na stav vzduchu u vlhké stěny působit vzdálenější okolí. Směry změny v obr. 3 sice zůstávají, velikost změny však přechází k nule. Stav okolního vzduchu se postupně blíží stavu na vlhké stěně. Povrch se přestává vysoušet a pokud je chlazen nebo syčen vztlakovou vlhkostí, dojde posléze k mokré kondenzaci dané průsečíkem příslušné izočary u' s mezní křivkou $\varphi = 100\%$. To je důvodem k potřebě rozbití oblastí stagnujícího vzduchu a jejich „oživení“ při-



Obr. 5a, 5b Bezrozměrné průběhy rychlosti (a) a teploty (b) u stěny při přirozené teplotní konvekci



Součinitel α_r je vůči α konvekce aditivní, nepatří to však pro určení β_x z Lewisova vztahu.

Hodnoty α dle (4c,d) mohou jako dolní odhad intenzity přestupu tepla sloužit k představě o vlivu nucené konvekce, pokud se pro určení

měřenou intenzitou proudění vzduchu přiváděného z prostoru vzdáleného od takto kritického povrchu.

Zbývá se soustředit na *druhou úlohu*, jak intenzivní má nucené proudění být, navrhnout způsoby které ho vyvolají a navrhnout detaily jeho využití.

Zde je především třeba splnit dva požadavky:

- účinky nucené konvekce musí být intenzivnější, než účinky konvekce samovolné, panující v interiéru předtím. Hlavním měřítkem je zde hybnost, dalšími rychlost a směr nuceně proudícího vzduchu.
- hybnost nucené konvekce musí dostatečně převyšovat hybnost samovolné konvekce, tj. nepřipustit její vliv v místech, kde je to nežádoucí.

Z nich vycházejí další konkrétní kroky:

- identifikovat zdroje a účinky samovolných teplotně-konvekcí jevů a vhodným výpočtovým modelem, s cílem jejich využití nebo potlačení, odhadnout jejich intenzitu, směr a tepelné účinky;
- zvolit vhodné způsoby a prostředky realizace nuceného proudění působící na správných místech;
- navrhnout způsob regulace a řízení teplotně-konvekcí procesů.

Měřítka pro posouzení významu teplotní samovolné konvekce poskytuje řešení její hydrodynamické a teplotní mezní vrstvy. Z bezrozměrného vyjádření rychlostí a teploty (obr. 5a, 5b) byly odvozeny prakticky použitelné vztahy pro:

hybnost samovolného proudu jednotkové šířky

$$I_{1X} = \int_0^{\delta_x} \int_0^{\xi_S} v^2(X, y) \cdot \rho_x(T(X, y)) dy = \rho_T \frac{X^4}{A \cdot B^2} \int_0^{\xi_S} \eta^2 \cdot d\xi \quad (5a)$$

$$\text{kde } \int_0^{\xi_S} \eta^2 \cdot d\xi \cong 0,105 = \text{konst}$$

entalpii tohoto proudu

$$H_{1X} = \int_0^{\delta_x} \int_0^{\xi_S} v(X, y) \cdot \rho_x(T(X, y)) \cdot c_p \cdot dy = \rho_T c_p \frac{X^4}{A \cdot B} |T_S - T_\infty| \int_0^{\xi_S} \eta \cdot \Theta \cdot d\xi \quad (5b)$$

$$\text{kde } \int_0^{\xi_S} \eta \cdot \Theta \cdot d\xi \cong 0,212121 = \text{konst}$$

množství vzduchu transportované tímto proudem

$$M_{1X} = \int_0^{\delta_x} \int_0^{\xi_S} v(X, y) \cdot \rho_x(T(X, y)) dy = \rho_T \frac{X^4}{A \cdot B} \int_0^{\xi_S} \eta \cdot d\xi \quad (5c)$$

$$\text{kde } \int_0^{\xi_S} \eta \cdot d\xi \cong 0,543 = \text{konst},$$

kde horní integrační mez ∞ byla s postačitelou přesností nahrazena (pošino-
vací, odtlačovací) tloušťkou δ_x mezní vrstvy v místě $x = X$.

Poznámka: Analogickým integrálem lze definovat i množství vlhkosti nesené
proudem a stavovými vztahy lze v něm také definovat průběh relativní vlhkosti
 $\varphi(X, y)$ vzduchu.

K využití nebo potlačení dynamického vlivu samovolné konvekce je třeba pře-
konat její hybnost nuceným prouděním působícím ovšem vhodným směrem.
Uplatní se proto směrovost, neboť hybnost je vektor. Hybnost nuceného
proudění však lze s jistotou určit pouze na jeho vstupu do prostoru. Na výstupu
ventilátoru je to například dáno jednoduchým vztahem k spotřebě energie jeho
motoru.

Je třeba ovšem mít na zřeteli, že se hybnost ve volném proudu v prostoru za-
chovává, rychlost proudu však vlivem ejekce okolního vzduchu klesá. V té sou-
vislosti je nutno nahlížet na lokální působení zdroje nuceného proudění a na
vliv tření na stěnách které hybnost snižuje.

O tepelném působení samovolné konvekce vypovídá hodnota entalpie, která je
také zachovací veličinou. Nucené proudění zde tedy působí směřovací me-
chanizmem. Je však třeba dbát i přestupu tepla na obtékaných plochách. To se
uplatňuje např. na oknech a stěnách v zimě, kdy je vhodné odhadnout riziko
„mokré“ kondenzace, zatímco v oken v létě je důležitý jejich podíl na přehřívání
vzduchu v chladnějším interiéru.

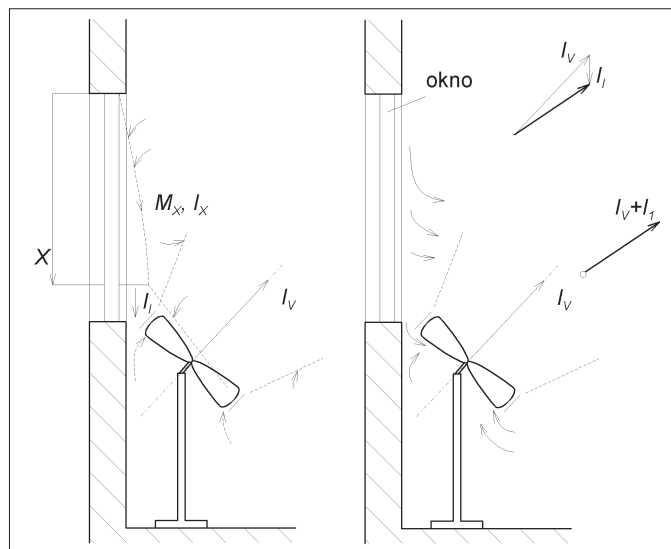
Množství vzduchu $M_{1,x}$ pak doplňuje názor na podíl samovolné konvekce v cel-
kovém obrazu proudění v prostoru.

3. PŘÍKLADY VYUŽITÍ

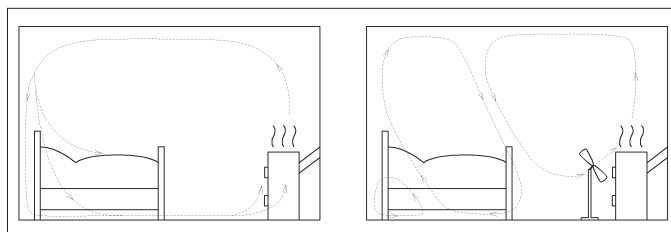
Jelikož intenzita proudění v historických prostorech a expozicích musí být
malá, omezíme se v následujícím na ilustrativní případy, kdy lze předpokládat
existenci samovolné konvekce a kdy lze jejich vlastností buď využít a její vliv
a účinek posílit, nebo naopak, kdy je nutno její vliv a vlastnosti potlačit. Jed-
noduchou cestou jak účelně ovlivnit prostorové působení samovolné konvek-
ce je proto práce s hybností a jejími vektory (jsou určeny směrové vektory
rychlostí).

Prvním příkladem je schematický obr. 6 znázorňující účinek stojanového venti-
látoru pod chladným oknem. Součet vektorů napovídá, že hybnost vzduchu vy-
volaná ventilátorem nemusí obecně být větší, než hybnost proudu podmíněná
samovolným prouděním v „místě“, kde je interakce, tj. kde tato místní hybnost
je zmenšená o podíl vyvolaný ztrátami třením na obtékaných plochách. Horní
odhad hybnosti každého z dílčích proudů (bez ztrát na cestě do sledovaného
místa) je zde možný. Při odhadu úhlu rozšíření proudu z ventilátoru je nutno
respektovat jeho zkrut (drall), úhel je zpočátku značně větší než odpovídá
tzv. součiniteli turbulence běžných výstupů z potrubí. Úkolem může být odhad
proudových čar výsledného proudění použitím směrových vektorů.

Dalším příkladem je nestacionární proces při kolísání teploty a s ním spojené
relativní vlhkosti vyvolávající „jev vlhkých peřin“ po zátopu ve vychladlé chalupě
(obr. 7a, b). Přirozená konvekce (a) od zdroje tepla ve svém důsledku dopravu-
je teplejší vzduch na peřiny, dřevo lůžka a podlahy, které jako sorpčně citlivý
materiál (malá hodnota směrnice $d\delta/du$) uvolňují podstatné množství vlhkosti.
Ta se dostává do vzduchu, odkud ji intenzivně (s velmi omezenou vlhkostní ale
vysokou tepelnou kapacitou) přijímá chladné zdívo. Zvláště v koutech při pod-
laze a za pelestí lůžka hrozí při zátopu v důsledku zmíněné malé vlhkostní ka-
pacitě zdíva mokrá kondenzace. Nucený oběh vzduchu řešený například pří-
davným ventilátorem (obr. 7b) rozloží přestup tepla a hmotnosti s ohledem na
tepelné a vlhkostní kapacity předmětů podstatně lépe a nestacionární fáze zá-
topu proběhne značně příznivěji. Opět, jako v předešlém případě, je zde sdru-



Obr. 6 Náznak sčítání vektorů celkové hybnosti přirozené a nucené konvekce



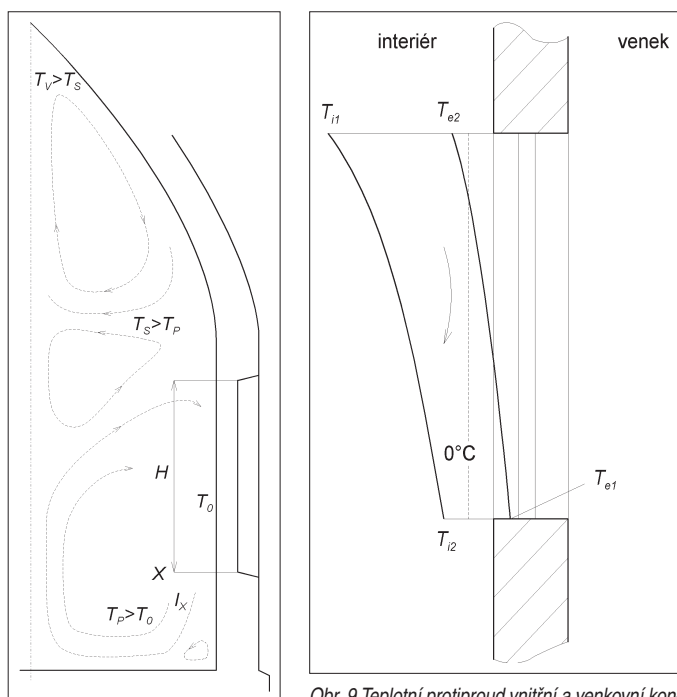
Obr. 7 Zátop ve vychladlé místnosti. Tendenci ke kondenzaci vlhkosti na stěně a v koutu u podlahy (a) snižá a ohřátí místnosti urychlí nucené proudění (b)

žen problém překonání hybnosti samovolné konvekce od tepelného zdroje
s problémem jeho tepelného výkonu (vyjádřen entalpií). Zde ovšem v globál-
ním významu pro celou místnost.

Analogicky je nucené proudění nezastupitelné i v případě potřeby zavětrat od-
stup mezi rubem zavěšeného obrazu a masivní stěnou pro dostatečný přístup
vzduchu (a kyslíku v něm obsaženého) proti hrozcímu nebezpečí vegetace
mikroorganismů ve vlhkém nezavětraném mikroprostoru za obrazem a poslé-
ze i jejich průnik do líce obrazu (Karlštejn, kaple Sv. Kříže).

Zajímavým případem je otázka vlivu přestupu tepla a vlhkosti na chladné stě-
ně resp. na vysokém chrámovém okně. Obr. 8 svědčí o potřebě změnit
charakter proudění umělým zdrojem a dalšími vhodně umístěnými přístroji
nastolit místně udržovanou teplotu a vlhkost vzduchu např. v okolí cenného
obrazu, oltáře apod. Analogické problémy (periodické navlhání a přesychání
předmětů) lze zde očekávat téměř po celý rok. Značný význam má i stav, kdy
líc zdíva za obrazem není zavětráním teplotně ovlivněn. Je-li zeď chladná,
může teplota na líci obrazu být trvale nižší než teplota v interiéru. Přirozenou
i nucenou teplotní konvekcí podmíněný gradient teploty vzduchu u povrchu
obrazu vyvolává termoforézni jev (transport prachu do malby), který s vyšší
rychlostí pohybu vzduchu sílí a spolu s elektrostatickými vazbami prachu do
prasklin malbu znehodnocuje neméně než vlhkost vzduchu. Podstatný je mj.
také fakt, že v prostoru s takto instalovanými obrazy ztrácí nucený pohyb
vzduchu své výhody a přednosti, neboť jeho pozitivní přínos v zadržování
prachu není významný.

Za úvahu stojí úloha o kondenzaci vody na okně, kdy hrají roli teploty jak vnitř-
ního a venkovního vzduchu, tak vnitřního líce zasklení a součinitel prostupu
tepla v němž je rozhodující součinitel α_1 přestupu tepla na vnitřním povrchu



Obr. 8 Teplotní konvekce od okna v severní polovině chrámu

Obr. 9 Teplotní protiproud vnitřní a venkovní konvekce ztěžuje kondenzaci vody na zasklení

okna. Součinitel přestupu tepla uvnitř spolu s velikostí a vertikálním rozložením vnějšího součinitele přestupu tepla popř. s intenzitou ozáření sluncem nebo sálavým výdajem okna k chladným plochám okolního prostoru a staveb rozhoduje o tom, zda teplota vnitřního líce skla zůstane nad rosným bodem vzduchu v interiéru.

Zjednodušený model pro úvahy poskytne představa protiprodu na rovinném teplosměnném povrchu okna dle obr. 9. V něm znázorněný průběh teplot a skutečnost, že součinitel přestupu tepla má maximum v bodě $x = 0$ mezní vrstvy svědčí o tom, že teplota vnitřního líce zasklení je nejvyšší nahoře a pravděpodobnost vzniku kondenzace vody na okně je v jeho dolních partiích. Rozšíření úlohy ovšem vyvolá vítr, ozáření okna sluncem a lokální skleníkový efekt uvnitř.

Jako poslední bod našich úvah o tom, které problémy je žádoucí dořešit, popř. co by měl projekt péče o mikroklíma památkově cenného prostoru předvídat a následně respektovat je pouze stručný poukaz na několik z mnoha dalších aspektů problematiky proudění vzduchu v interiérech:

- ❑ vývoj metod řešení a techniky měření dat v přenosu tepla a vlhkosti v cenných sbírkách a interiérech, ve vlhkých sklepech a základech velkoprostorových staveb;
- ❑ střídavý (sezónní) teplotní režim (den/noc) v obývaných nebo návštěvnicky variabilně frekventovaných historicky cenných stavbách;
- ❑ kriteria vyjadřující kvalitu proudění [1], [5] a dostačující účinek jeho nucené složky;
- ❑ technika měření malých rychlostí a hybnosti vzduchu;
- ❑ využití meteorologických dat, zejména měrné vlhkosti venkovního vzduchu ve výpočtech přenosových jevů, neohledně k řadě fyzikálních jevů spadajících zde do nauky o elektřině a k obecnému významu elektrické energie pro úpravu mikroklimatu v historických stavbách.

Z dosud řečeného je také zřejmé, že úspěch vysoušení památkového objektu se záměrem užití minima technických prostředků, zejména občasně sezónní temperace prostorů, si vynutí vhodnou automatickou regulaci orientovanou zejména na stavy vzduchu venku.

Úvahy souvisící se vztahem proudění k vlhkosti v historických stavbách a jejich interiérech směřovaly jednak k informaci čtenáře o náročnosti úloh, před které může být postaven projektant vzduchotechniky a vytápění, jednak k ulehčení rozhodnutí v otázce, nakolik a kdy má význam komplexní pohled na problém proudění vzduchu v historicky cenných prostorech, kde intenzivní procesy a jejich výkyvy nejsou žádoucí. Proto je zde zdůrazněn význam samovolné tíhové konvekce v pomalých procesech i z toho vyplývající nutná opatrnost ve využívání souměřitelného nuceného proudění a malých rychlostí vzduchu. Nelze pominout ani záměr ukázat, že v otázkách proudění vzduchu v historických objektech zbývá ještě dosti práce k získání jistoty jak správně uvažovat a co dělat, aby se upravený vzduch dostal tam kde ho potřebujeme.

Jestliže kromě toho byla dostatečně doložena potřeba vyjasnění zde naznačených otázek před zadáváním projektového úkolu a zahájením prací na projektu pro historické objekty, splnil příspěvek záměr, s nímž byl napsán.

Použité zdroje:

- [1] TRITTON, D. J.: *Physical Fluid Dynamics*. Van Nostrand Reinhold Company, New York-Cincinnati – Toronto – London – Melbourne, 1977
- [2] KUTATELADZE, S. S.: *Osnovy teorii teploobmena*. Mašgiz, Moskva – Lenin-grad, 1962
- [3] ŠORIN, S. N.: *Sdílení tepla*. SNTL/ALFA, Praha, 1968
- [4] CHYSKÝ, J.: *Vlhký vzduch*. SNTL, Praha, 1977
- [5] KUTATELADZE, S. S.: *Pristěnnaja turbulentnosť*. Izd. Nauk, Sib. otdělení, Novosibirsk, 1973
- [6] NĚMEČEK, M., PAPEŽ, K.: *Úprava vzduchu v historických objektech*. Vytápění, větrání, instalace, 10, č. 4, 2001, s. 150-158. ■

*** Pilotní projekt velké větrné turbíny ve Francii**

Severně od La Rochelle bude začátkem roku 2004 uvedena do chodu velká větrná turbína. Tato realizace je možná zejména díky neobvyklému způsobu financování. V současné době se čeká na stavební povolení, jehož vydání se očekává v září 2003 (po již uděleném souhlasu místních obyvatel).

Turbína o jmenovitém výkonu 2 MW má 80 metrů vysoký stožár. Bude vybudována v mělké pobřežní vodě 60 m od pobřeží u Pitou – Charentes, 800 m od nejbližších obydlí. V této oblasti stálých větrů se očekává roční výroba 4000 MWh elektřiny, která odpovídá roční spotřebě asi 2000 domácností. Náklady na výstavbu jsou propočteny na 3 miliony €. Pro realizaci projektu byla v červenci 2002 založena na universitě v La Rochelle, která byla do projektu zapojena od r. 1996, společnost s ručením omezeným L'Eolienne. Společnost začala s počátečním kapitálem 43 000 €. V letošním roce vydala výzvu svým 89 podílníkům, institucím i jednotlivcům, ke zvýšení počátečního jmění na 253 000 €.

Nyní má společnost 6 skupin podílníků – manažerů projektů, dodavatelů součástí větrných turbin, místní zastupitelstva, výzkumné organizace, společnosti a jednotlivce ze 31 francouzských okresů. V Charente – Maritime však žije 40 % zainteresovaných osob. Tato neobvyklá finanční struktura znamená, že tento projekt větrné turbíny je prvním účastnickým projektem tohoto druhu ve Francii.

Vedení společnosti L'Eolienne by tímto způsobem chtělo pokračovat v další výstavbě velkých větrných elektráren při pobřeží tak, aby v r. 2010 bylo dosaženo cíle – celkového instalovaného výkonu větrných elektráren 2000 MW. Je si však vědomo, že realizace takového cíle je zcela závislá na postoji místních obyvatel a dokonce i na jejich kapitálové účasti. Tento postoj je v daném případě (a místě) příznivý, ale není známo, jak by tomu bylo i při další výstavbě velkých větrných farem.

Kontakt: www.eolienne.larochelle.fr
EEP Newsletter, červen 2003

(Br)