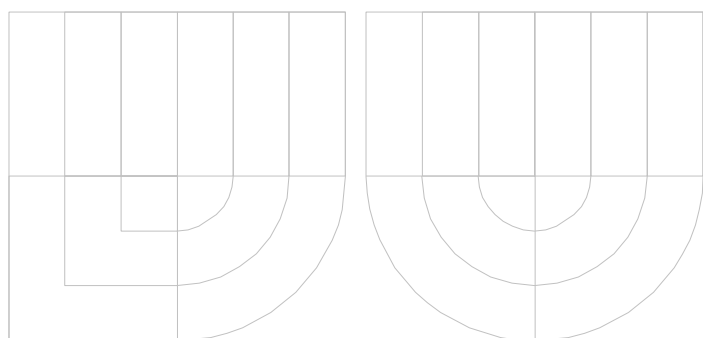


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ



VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ



Fyzika stavebních látek

návody do cvičení

FAKULTA
STAVEBNÍ

BRNO 2015

Obsah:

<i>1. Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ deskových materiálů.....</i>	<i>3</i>
<i>2. Stanovení součinitele teplotní vodivosti a</i>	<i>7</i>
<i>3. Stanovení hodnoty teplotního útlumu v stěnové konstrukce</i>	<i>9</i>
<i>4.a. Stanovení vlhkostních objemových změn pro základní stavební materiály.....</i>	<i>12</i>
<i>4.b. Měření vlhkosti vzduchu psychrometrickou metodou</i>	<i>17</i>
<i>5. Zjišťování rozložení teplot v teplotním poli elektroanalogickou metodou</i>	<i>20</i>
<i>6. Stanovení tepelných mostů v konstrukci metodou infračervené termografie</i>	<i>22</i>
<i>7. Kontinuální měření součinitele difúze vodní páry.....</i>	<i>26</i>
<i>8. Stanovení materiálové vlhkosti pomocí přímých a nepřímých metod.....</i>	<i>32</i>

Tyto návody do cvičení vznikly na Stavební fakultě Vysokého učení technického v Brně za finanční podpory projektu FRVŠ F1/a 2622/2012 „Inovace studijního předmětu Fyzika stavebních látek se zavedením nové úlohy“.

V Brně 2015

prof. RNDr. Ing. Stanislav Št'astník CSc.

Ing. Jiří Zach, Ph.D.

Ing. Jaroslav Nováček

Ing. Bc. Jitka Hroudová

1. Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ deskových materiálů

Metoda stanovení:

Princip měření součinitele tepelné vodivosti λ založeno na průchodu ustáleného (stacionárního) toku tepla z měřicí topné desky do desky chladící zkoušeným deskovitým vzorkem.

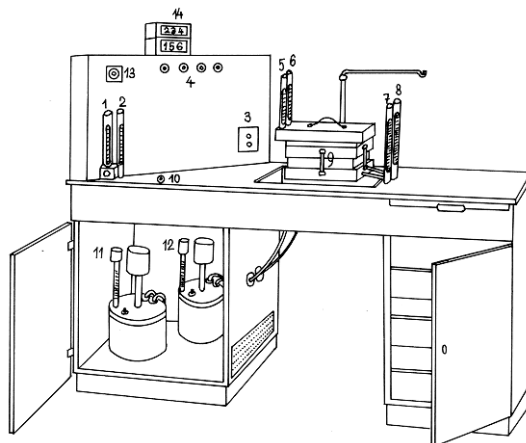
Součinitel tepelné vodivosti λ vyjadřuje množství tepla, které projde za ustáleného teplotního stavu za časovou jednotku zkoušenou látkou jednotkovou plochou a jednotkové tloušťce při rozdílu povrchových teplot 1 K. Z Fourierovy rovnice vyplývá:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2} \quad \left| \frac{d\theta}{d\tau} = 0 \right.$$
$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = 0$$
$$q = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx}$$

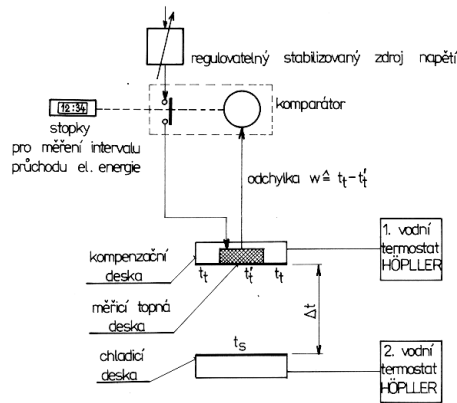
Popis měřícího zařízení:

Jedním ze způsobů používaných při stanovení součinitele tepelné vodivosti λ je přístrojem podle Dr. Bocka. Měření je založeno na průchodu stacionárního toku tepla z měřicí topné desky do desky kompenzační zkoušeným deskovitým fragmentem vzorku. Měřicí topná deska je zabudována do desky kompenzační, která je temperována na stejnou teplotu jako měřicí topná deska a tím se eliminují tepelné ztráty do okolí mimo vzorek. Při ustáleném (stacionárním) tepelném toku, kdy teploty měřicí topné desky a desky kompenzační jsou stejné (teplotní spád mezi nimi je nulový), může tepelný tok z měřicí topné desky procházet pouze a jen měřeným materiálem k chladicí desce.

Kompenzační deska je temperována na stanovenou teplotu protékající vodou z termostatu a rovněž tak i deska chladící je temperována protékající vodou z druhého termostatu. Měřicí topná deska je otápěna elektrickou energií a množství spotřebované elektrické energie za časový interval je registrováno. Z množství tepla dodaného měřicí topnou deskou za časovou jednotku, tloušťky vzorku, teplotního spádu na vzorku a individuální konstanty přístroje se vyjádří hodnota součinitele tepelné vodivosti λ zkoušeného materiálu.



Uspořádání Bockova přístroje



Funkční schéma Bockova přístroje

Popis přístroje:

Měřicí část Bockova přístroje se skládá z horizontálně uložených hliníkových desek o rozměru 250 x 250 mm, mezi něž se vkládá měřený deskovitý materiál. Horní deska je topná. Uprostřed této desky je umístěna měřicí topná deska o průměru 116 mm zabudovaná do desky kompenzační. Měřicí topná deska je vytápěna z regulovatelného stabilizovaného zdroje stejnosměrného napětí přes komparátor, který je řízen napětím diferenční termočlávkové termobaterie. Jestli-že jsou stejné teploty měřicí topné desky i desky kompenzační, termoelektrický potenciál diferenční termočlávkové termobaterie je nulový. Jestli-že však se vyskytne teplotní rozdíl mezi oběma deskami, potom se na výstupní svorce objeví takový potenciál, který je úměrný teplotnímu rozdílu (polarita je závislá na tom, která deska chladnější či teplejší).

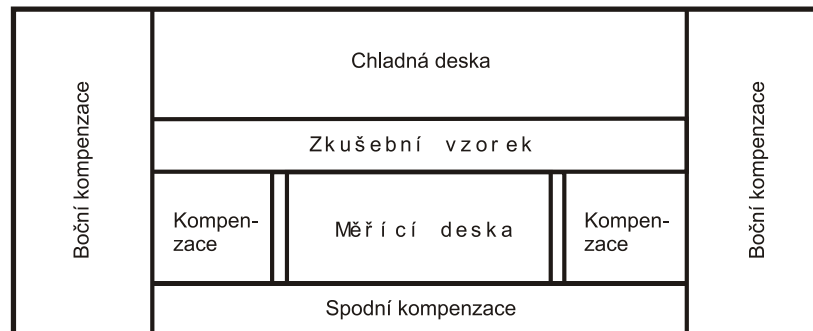
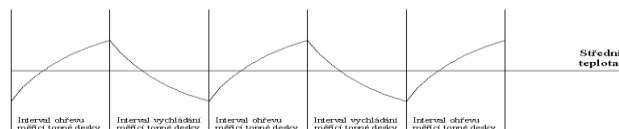


Schéma měřicí části Bockova přístroje

Komparátor je přímo spojen s diferenční termočlávkovou termobaterií a přes relé připojuje měřicí topnou desku ke zdroji stabilizovaného napětí jen tehdy, jestli-že teplota měřicí topné desky poklesne vůči teplotě desky kompenzační. Při vyrovnání teplot obou desek se vypne přívod proudu do měřicí topné desky. Vytápění měřicí topné desky na teplotu desky kompenzační probíhá v podobě pravidelných elektrických impulzů.



Vyobrazení průběhu teploty měřicí topné desky řízené dvoustavovým regulátorem

Tepelný tok vzorkem je závislý na jeho tepelně-izolačních vlastnostech a podle toho je třeba nastavit velikost stabilizovaného napětí zdroje pro vyhřívání měřicí topné desky. Napětí se nastavuje víceotáčkovým potenciometrem. Pro korektní stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ měřeného vzorku je nutné, aby spotřeba elektrické energie byla přímo úměrná tepelnému toku. Toho se dosáhne, jestliže impulsy elektrického proudu do měřicí topné desky byly v pravidelných časových intervalech. Splnění této podmínky lze sledovat na elektrických stopkách (doba jejich zapnutí musí být stejná jako doba vypnutí).

Chladicí i kompenzační deska je temperována protékající vodou z termostatů typu Höppler, jejichž teplota se nastavuje na regulačních teploměrech. Pro správnou funkci termostatů je do vodního systému zavedena chladná voda z vodovodní sítě. Ovládání se provádí ventilem, který řídí průtok chladicí vody.

Teplota přitékající a odtékající vody v obou deskách přístroje se měří cejchovanými rtuťovými teploměry. Údaje teploměrů je proto nutné převést podle příslušné cejchovní křivky na skutečnou teplotu.

Postup při stanovení:

1) Pro měření se použije deskových čtvercových vzorků o délce hrany 25 cm. Vzorek musí být na protilehlých plochách rovnoběžně zabroušen, aby desky přístroje těsně doléhaly k jeho povrchu. V případě nerovných povrchů by mezery mezi styčnými plochami ovlivnily výsledek měření.

2) Suchý připravený vzorek se vloží mezi desky přístroje, dbá se přitom, aby se při vkládání vzorku desky nepoškrábaly a aby doléhaly těsně na vzorek. Po uložení vzorku se měří výška vzorku (přitom je třeba zohlednit korekci na nulovou polohu mikrometrických šroubů). Přesahuje-li výška vzorku 50 mm, našroubují se na mikrometrické šrouby nástavce. Mikrometrickými šrouby se měří na "slabý doraz" a zaznamenají. Po uložení vzorku se měřicí soustava zakryje izolační skříní.

3) Na zadní straně přístroje se otevře přívod vody. Množství protékající vody se řídí ventilem a udržuje v intervalu 0,5 - 1,0 dm³/min. Nastavení kontaktních teploměrů v termostatech má být takové, aby rozdíl teplot mezi topnou a chladicí deskou byl asi 10 K, přičemž nastavení teploty na kontaktním teploměru pro chladicí desku musí být o 3 - 4 K vyšší než teplota chladicí vody přitékající z vodovodu (při cvičení neprovádět, je již nastavena!).

Zapne se hlavní vypínač na rozvodné desce. Správný chod termostatů - stejná doba zapnutí a vypnutí elektrického okruhu v topném tělese se upraví potřebným průtokem chladicí vody pomocí ventilu (pro cvičení je již nastaveno). Podobně se upraví stejná doba zapnutí a vypnutí elektrického okruhu v měřicí topné desce nastavením potřebného výkonu víceotáčkovým potenciometrem. Nastavení se seřizuje podle poměru časů digitálních stopek. Jsou-li zapnuty dlouho, znamená to, že měřicí topná deska není dostatečně vytápěna a je třeba stupeň výkonu zvýšit. Podobně je tomu i v opačném případě - při krátké době vyhřívání měřicí topné desky je třeba stupeň výkonu snížit. Po jisté době (pro cvičení asi 30 minut) se teplota na styčných plochách vzorku vyrovná a tepelný tok ustálí. Stacionární tepelný tok se projeví pravidelným chodem stopek, které se v pravidelných intervalech zastaví.

4) Při měření se zaznamenávají v následujícím pořadí tyto údaje:

- i) teplota prostředí (teploměr uložen ve skříňce přístroje)
- ii) před začátkem každého měřicího intervalu se odečítá teplota na teploměrech 5, 6, 7 a 8 na dvě desetinná místa. U všech teploměrů hladina rtuti mírně kolísá, bere se proto jejich střed. Odečítání má trvat co nejkratší dobu, nemá přesáhnout 5 minut.
- iii) Nastavení napětí víceotáčkovým potenciometrem, k němuž odečteme příslušné napětí na voltmetru, se po ustálení tepelného toku nesmí měnit.
- iv) Ve vymezeném časovém intervalu τ_1 , který je doporučen 15 - 30 minut, se sleduje doba vytápění měřicí topné desky elektrickým proudem ze stabilizovaného zdroje napětí τ_2 . Měření sestává nejméně ze tří intervalů τ_1 .

Vyhodnocení:

Pro výpočet součinitele tepelné vodivosti λ neznámých vzorků se vychází z ekvivalence velikosti tepla vybaveného na elektrickém odporu měřicí topné desky Q_1 a velikosti tepla prošlého měřeným vzorkem Q_2 .

Jouleovo teplo:
$$Q_1 = \frac{U^2}{R} \cdot \tau_2,$$

kde: U napětí přiložené na elektrický odpor měřicí topné desky (V)
 R elektrický odpor měřicí topné desky (ohm)
 τ_2 časový interval, po který je elektrický topný odpor napájen ze stabilizovaného zdroje (s)

Množství tepla prošlého vzorkem:
$$Q_2 = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta\theta \cdot S \cdot \tau_1$$

λ součinitel tepelné vodivosti měřené látky [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 d tloušťka vzorku [m],
 $\Delta\theta$ teplotní spád na vzorku ve směru tepelného toku [K],
 S plocha měřicí topné desky [m^2] - průměr desky činí 116 mm,
 τ_1 časový interval pozorování [s].

Sloučením obou vztahů za předpokladu ekvivalence $Q_1 = Q_2$ platí: $\frac{\lambda}{d} \cdot \Delta\theta \cdot S \cdot R = U^2 \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}$. Po zavedení korekční hodnoty Θ z důvodu tepelných ztrát bočním vyzařováním získáme vztah

$$\lambda = \frac{U^2 \cdot d \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}}{(\Delta\theta - \Theta) \cdot S \cdot R} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Konstanty přístroje: $R = 72,4352$ ohm
 $S = 0,0105683$ m^2 ,
 Θ = korekční hodnota uvedená na přístroji [K],
 U = hodnota napětí odečtená na voltmetru [V].

2. Stanovení součinitele teplotní vodivosti a

Metoda stanovení:

Součinitel teplotní vodivosti a vyjadřuje rychlost vyrovnávání teploty při neustáleném šíření tepla v tělese podle Fourierova vztahu:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2}$$

Popis měřícího zařízení:

Měřící zařízení sestává z měděné nádoby, která je naplněná vodou a zahřívána k varu vaříčem. Ve víku měděné nádoby s vodou je otvor pro umístění menší nádoby naplněné roztaveným kovem (Woodův kov nebo rtuť). Vzorky zkoušeného materiálu se zbrúšením upraví na plochá tělíska, jejichž tloušťka má být 5 – 10 mm a jejichž plochy mají být rovnoběžné a hladké.

Zkoušené vzorky se pro vlastní proměření připraví tak, že se na vytemperované zkušební tělísko na teplotu prostředí laboratoře (asi 20 °C) umístí na střed horní plochy několik krystalků difenylaminu, který má bod tání $\theta_i = 54$ °C. Vytemperované zkušební tělísko se pokládá doprostřed nádoby naplněné roztaveným kovem a od okamžiku položení na hladinu kovu se sleduje časový interval do roztavení krystalků difenylaminu. Takto zjištěný časový interval definuje rychlost průchodu teplotní vlny zkoušeným vzorkem.

Postup při stanovení:

Nejprve se mikrometrickým měřítkem odměří tloušťky jednotlivých vzorků a rovněž i tloušťky kalibračních tělísek, u nichž je předem známá hodnota součinitele teplotní vodivosti a (sklo). Po tomto měření se doprostřed tělísek umístí několik krystalků difenylaminu (3 – 5 krystalků, poněvadž při nepatrné hmotnosti teplotního indikátoru se dosáhne okamžité fázové přeměny bez významné deformace teplotní vlny). Dále se zkušební tělíska uloží do skleněné nádoby – exsíkátoru – s teploměrem, jehož vnitřní prostředí zajistí ustálení teplotní úrovně vzorků na stejnou teplotu. Tato doba by neměla být kratší než 15 minut. Mezitím se uvede vodní lázeň varu a rovněž se na stejnou teplotu ohřeje vnitřní nádobka s roztaveným kovem. (Pro cvičení lze namísto temperované nádoby s kapalným kovem použít temperovanou kovovou desku).

Ze skleněné nádoby pro temperování vzorků se laboratorními kleštěmi vyjme vzorek opatřený několika krystalky difenylaminu na horní lícové ploše a položí na hladinu kovu. V tom okamžiku se uvedou do chodu stopky a sleduje se čas do okamžiku roztavení krystalků difenylaminu. Po měření se zkušební tělísko laboratorními kleštěmi vyjme a vloží do misky, v níž se ještě za horka setře hadříkem roztavený difenylamin a případné zbytky ulpělého kovu na povrchu vzorku.

Zkouší se nejméně tři vzorky a za výsledek se považuje střední hodnota ze získaných měření.

Vyhodnocení:

Pro výpočet součinitele teplotní vodivosti a neznámých vzorků je nezbytné stanovit konstantu k měřícího zařízení za základě měření kalibračního zkušebního tělíska, u něhož je známa hodnota součinitele teplotní vodivosti a .

Výpočetní vztah pro určení součinitele teplotní vodivosti a je formulován:

$$a = k \cdot \frac{h^{1,7}}{\tau} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

kde: k konstanta měřicího zařízení
 h tloušťka zkušebního tělíska [m]
 τ doba průchodu teplotní vlny zkušebním tělískem [s].

Ke stanovení kalibrační konstanty k měřicího zařízení se použije sklo, u něhož jsou známy všechny potřebné fyzikální veličiny pro výpočet a :

$$\lambda = 0,828 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\rho = 2491 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$c = 754 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}.$$

Podle uvedených údajů se vypočítá součinitele tepelné vodivosti a :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Po vyčíslení konstanty zařízení k se vypočítá součinitele tepelné vodivosti jako aritmetický průměr nejméně tří jednotlivých výsledků. Výsledná hodnota se vyjádří na tři desetinná místa s exponentem $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Stanovení hodnoty teplotního útlumu ν stěnové konstrukce

Metoda stanovení:

Teplotní útlum ν stavební konstrukce je vyjadřován jako poměr teplotní amplitudy venkovního vzduchu t_e vůči teplotní amplitudě vnitřního povrchu konstrukce vyvolané vlivem vnějšího prostředí.

Teplotní útlum ν stavební konstrukce je vyjádřen vztahem:

$$\nu = \frac{A_e}{A_{si}} \quad [-] \quad (1)$$

kde: A_e teplotní amplituda vnějšího prostředí [K]
 A_{si} teplotní amplituda vnitřního povrchu [K]

Při letním oslunění v důsledku sálajících slunečních paprsků je teplota vnějšího povrchu stavební konstrukce zpravidla vyšší než je teplota vnějšího prostředí a pro tento případ platí vztah:

$$\nu = \frac{A_{se}}{A_{si}} \quad [-] \quad (2)$$

kde: A_{se} teplotní amplituda vnějšího povrchu stavební konstrukce [K]
 A_{si} teplotní amplituda vnitřního povrchu [K]

Teplotní útlum stěny je úměrný jejímu tepelnému útlumu R a tepelné pohltivosti s_τ , kde τ je interval teplotního kmitu. Hodnota tepelné jímavosti b je dána součinem hodnot λ, ρ, c . Za běžných podmínek střídání teplot dne a noci činí interval teplotního kmitu 24 hodin. Periodické kolísání teplot se dá s dostatečnou přesností nahradit harmonickou funkcí a okrajové podmínky laboratorně.

Při laboratorním modelování vnějších teplot se volí interval zpravidla kratší, například několik hodin. Jelikož hodnota tepelné jímavosti b a tepelného odporu R jsou pro danou stěnu konstantními hodnotami, je výsledek měření ovlivněn pouze intervalem teplotního kmitu τ . Výsledek teplotního útlumu ν získaný při tomto kratším intervalu sledování, se přepočítá na hodnotu teplotního útlumu pro interval $\tau = 24$ hodin (hodnota teplotního útlumu, aniž je uvedeno, se rozumí pro interval 24 hodin).

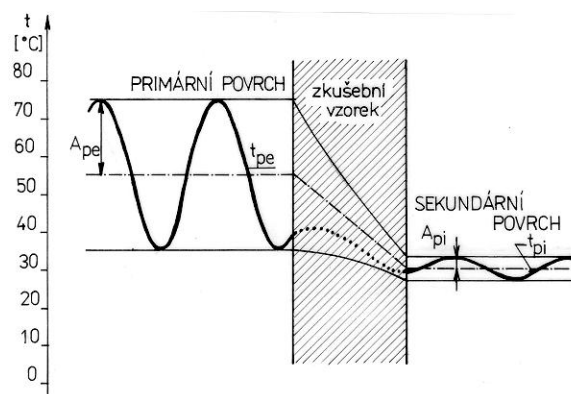


Schéma teplotního průběhu na površích a uvnitř vzorku

Popis měřicího zařízení:

Při laboratorním měření teplotního útlumu se modeluje sinusový harmonický průběh teploty na povrchu deskovitého materiálu. Na protilehlém povrchu vzorku sledujeme průběh teploty jako odraz tepelně-technických vlastností zkoušeného materiálu.

Vzorek deskovitého tvaru o ploše 250 x 250 mm s připevněnými teplotními čidly – v tomto případě je užito termočlánků K (NiklChrom - Nikl) o průměru 0,2 mm – pro sledování povrchových teplot, se pomocí stahovacích úhelníků připevní na stolek nosiče vzorku. Povrch deskovitého vzorku je z primární strany zahříván infračervenými paprsky ze čtyř žárovek směřovaných tak, aby se jejich osy vyzařování protínaly přibližně ve středu vzorku. K zamezení vyzařování infračervených paprsků do prostoru mimo povrch vzorku je ke vzorku těsně přisunut plechový kryt tvaru komolého jehlanu, jehož reflexní povrch usměrní paprsky na povrch vzorku. Infračervené žárovky jsou napájeny síťovým napětím 220 V a jejich výkon se řídí regulačním transformátorem. Termoelektrická napětí termočlánků, se přivádí do teplotní centrály, která zobrazuje hodnoty okamžitých teplot na měřících koncích termočlánků.

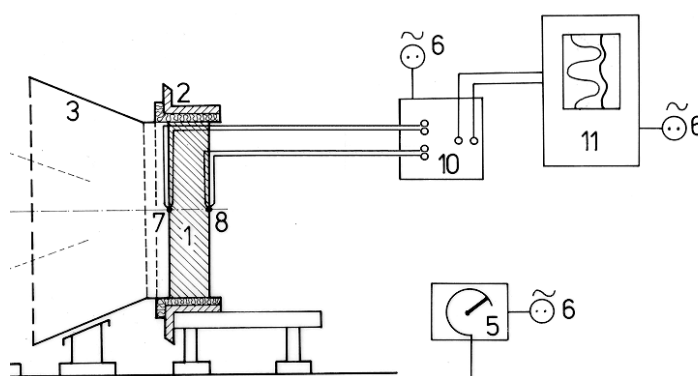


Schéma sestavy a zapojení komponent při měření teplotního útlumu

1. Vzorek ve tvaru desky
2. Upevňovací rám vzorku se stojanem
3. Reflexní kovový rám
4. Stojan s infračervenými žárovkami
5. Regulační autotransformátor
6. Síťová přípojka
7. Termočlánek pro měření povrchové teploty θ_{sc}
8. Termočlánek pro měření povrchové teploty θ_{si}
10. Kompenzace měřících termočlánků
11. Teplotní centrála

Pro exaktní měření je třeba zajistit, aby kolem vzorku nedocházelo k jinému proudění vzduchu než vyvolanému v důsledku rozdílu teplot vzduchu a povrchu vzorku. Je proto vhodné umístit zařízení do uzavřeného prostoru.

Postup při stanovení:

1. Proveďte výběr zkušební vzorku, po konzultaci s vedoucím cvičení. K dispozici jsou zkušební vzorky tvaru desky o rozměrech 250 x 250 mm z různých stavebních materiálů a dále jsou k dispozici vzorky sendvičového typu, které jsou složeny z více materiálů a demonstrují skladbu reálného obvodového pláště.
2. Deskový vzorek je potřebné nejprve upravit na rozměr 250 x 250 mm a upevnit jej stahovacími úhelníky stojanu. Na povrchy vzorku se z obou stran připevní drátové termočlánky a k takto připravenému vzorku se přisune plechový reflexní kryt. Před tento kryt se umístí stojan s infračervenými žárovkami ve

vzdálenosti odpovídající průsečíku os vyzařování jednotlivých žárovek (tato sestava je pro cvičení připravena).

3. Připojí se regulační autotransformátor a teplotní centrála do sítě (! provádí výhradně vedoucí cvičení!).
4. Regulačním autotransformátorem se nastaví výchozí minimální osvit primárního povrchu, aby byla dosažena počáteční požadovaná teplota na ozařované straně zkušební vzorku.
5. Jakmile je teplota na primárním povrchu ustálená, započne se s vlastním měřením. Na primárním povrchu zkušební vzorku (osvícená plocha) modelujeme regulováním výkonu infračervených žárovek sinusový teplotní průběh a na sekundárním povrchu zároveň sledujeme teplotní průběh. Postupně podle tabulky v předepsaných časových intervalech po 1. minutě nastavujeme teplotu primárního - ozařovaného - povrchu vzorku. Nastavení teploty primárního povrchu se provádí jen zvolna regulačním transformátorem po několika dílcích, protože časová odezva zásahu změny napětí trvá cca 20 vteřin. **V časových intervalech po 1. minutě zapisujeme okamžité hodnoty teploty na primárním i sekundárním povrchu zkušební vzorku.**

Vyhodnocení:

Průběh teplot se zaznamenává tak dlouho, aby se zachytila celá teplotní perioda na primárním povrchu a ještě alespoň zřetelná poloha minima teplotního kmitu na sekundárním povrchu. Naměřené hodnoty se vynesou do grafu. Potom se graficky vyhodnotí amplitudy teplotních kmitů a z nich se vyjádří hodnota teplotního útlumu ν [-] pro časovou periodu τ a hodnoty fázového zpoždění Ψ [s] teplotní vlny.

Tab. 1: Předpis teplotního průběhu na primárním povrchu zkušební vzorku

Čas [min]	Teplota [°C]	Čas [min]
0	25,0	60
1	25,1	59
2	25,5	58
3	26,1	57
4	26,9	56
5	27,9	55
6	29,1	54
7	30,5	53
8	32,1	52
9	33,8	51
10	35,7	50
11	37,6	49
12	39,7	48
13	41,9	47
14	44,1	46
15	46,3	45
16	48,5	44
17	50,7	43
18	52,8	42
19	54,9	41
20	56,9	40
21	58,8	39
22	60,5	38
23	62,1	37
24	63,5	36
25	64,7	35
26	65,7	34
27	66,5	33
28	67,1	32
29	67,4	31
30	67,5	30

4.a. Stanovení vlhkostních objemových změn pro základní stavební materiály

Úvod

Většina stavebních materiálů obsahuje ve své struktuře určité množství pórů. Tyto póry jsou schopné přijímat vlhkost nejen ve formě kapaliny, ale také z vodní páry obsažené ve vzduchu. V závislosti na změnách obsahu této vlhkosti dochází k objemovým změnám, které jsou svou velikostí porovnatelné s teplotními objemovými změnami. Je tedy žádoucí porozumět příčinám a důsledkům těchto jevů.

V exsikátorech je připraveno pět sad zkušebních vzorků vyrobených z nejčastěji používaných stavebních materiálů s pórovitou strukturou. Celkem je připraveno dvanáct kusů vzorků o rozměrech 40x40x160mm pro každý materiál. Jedná se o sádku, cementovou pastu (CEM I 42,5 R), smrkové dřevo orientované kolmo na směr vláken, pískový pórobeton a keramický střepek z cihly plně pálené. Vždy tři vzorky od každého materiálu jsou dlouhodobě uloženy v exsikátorech s různou úrovní relativní vlhkosti vzduchu dle obrázku níže. Tato prostředí jsou vytvořena pomocí nasycených roztoků solí uvedených v tabulce 2, které si při stálé teplotě a tlaku udržují nad svou hladinou konstantní relativní vlhkosti vzduchu.

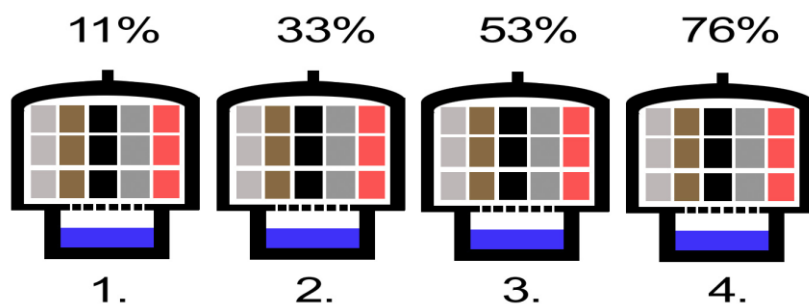


Schéma postupu kondicionování vzorků v prostředích s různou relativní vlhkostí

Tab.2: Přehled použitých solných roztoků a jim odpovídajících relativních vlhkostí vzduchu

Nasycený roztok soli	přibližná relativní vlhkost vzduchu nad roztokem při 23°C [%]
chlorid lithný	11
chlorid hořečnatý	33
dusičnan hořečnatý	53
chlorid sodný	76

Vzorky byly do vlhkostních prostředí uloženy ve vysušeném stavu a díky dlouhodobému procesu sorpce, čili samovolnému přijímání vzdušné vlhkosti pórovitým materiálem, jsou nasyceny na jistou rovnovážnou úroveň vlhkosti u_m . Tento dodatečný příjem hmoty do pórového systému má za následek změnu objemu sorbujícího materiálu. Projev objemové změny lze vyjádřit například určením délkové změny ε v podélné ose vzorku ustáleného na rovnovážnou vlhkost vůči vzorku vysušenému.

Úkolem je stanovit pro tři vybrané materiály závislosti poměrného vlhkostního délkového přetvoření ε na hmotnostním obsahu vlhkosti u_m ve zkušebních vzorcích a dále sorpční izotermu, která vyjadřuje závislost hmotnostního obsahu vlhkosti u_m na relativní vlhkosti vzduchu φ . Toto stanovení vychází z exsikátorové metody dle ČSN EN ISO 12571 - Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků - Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností.

Postup při stanovení:

Stanovení provedte pro 3 zvolené materiály, které budou vybrány vyučujícím. Se vzorky pracujte velmi obezřetně tak, aby nedošlo k jejich mechanickému poškození, které by znehodnotilo další měření!

Stanovení relativního vlhkostního přetvoření ε a ustálené sorpční vlhkosti u_m provedte následujícím způsobem:

- Před měřením vlastních vzorků vložte mezi trny komparátoru délkový etalon, ke kterému jsou vztaheny všechny měřené délky při nulové relativní vlhkosti a zaznamenejte jeho délkovou hodnotu $e_{aktuální}$ pro srovnání s vámi měřenými délkami.
- Vyjměte tři vzorky vybraného materiálu z prvního exsikátoru. Exsikátor ihned znovu zakryjte víkem. (Nikdy nepokládejte víko na broušený těsnící okraj!! K odložení víka použijte jako stojan plastovou nádobu.)
- U všech třech vzorků provedte měření aktuální hmotnosti m pomocí laboratorních vah s přesností na dvě desetiny gramu.
- Dále u všech tří vzorků stanovte aktuální délkový rozměr $l_{aktuální}$ v podélném směru za pomoci osazení mezi trny délkového komparátoru s úchylkoměrem Sylvac, měření provedte s přesností na tisícinu milimetru.
- Každý vzorek je opatřen ocelovými centrovacími koncovkami, kterými se vkládá mezi trn komparátoru a měřicí trn digitálního úchylkoměru podle obrázku – viz. níže. Po vložení vzorku mezi trny je nutno s ním opatrně otáčet kolem podélné osy tak dlouho až dojde ke stabilizaci údaje o naměřené délce na displeji úchylkoměru (jedná se o nejnižší naměřenou hodnotu).
- Vzorky uložte zpět do stejného exsikátoru na prokládky a exsikátor zakryjte víkem.
- Tento postup opakujte pro zbývající sady třech vzorků vybraného materiálu, které jsou uloženy v dalších exsikátorech s různou úrovní relativní vlhkosti.

Postup měření délkové změny na délkovém komparátoru:

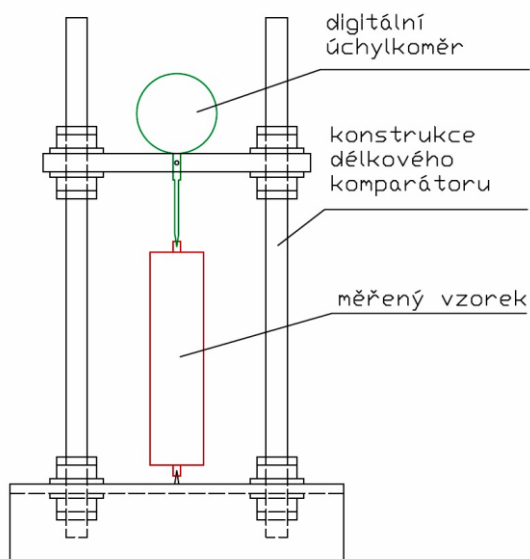


Schéma délkového komparátoru



Vyobrazení dilatometrického etalonu vyrobeného z tyčinky křemičitého skla s nízkou teplotní roztažností, ocelových centrovacích koncovek a krycí plastové trubičky.

Vyhodnocení:

Sorpční rovnovážnou vlhkost u_m zkušební vzorku při dané teplotě a relativní vlhkosti vypočtete dle vztahu:

$$u_m = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde m je aktuální hmotnost vzorku v gramech a m_0 je hmotnost vysušeného vzorku v gramech. Od každé hmotnosti odečítáme 12,5g, což je hmotnost obou centrovacích koncovek a použitého lepidla.

Poměrné délkové přetvoření zkušební vzorku ε vypočtete ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{(l_{\text{aktuální}} - e_{\text{aktuální}}) - (l_0 - e_0)}{l_{\text{základní}}} \quad [-]$$

kde: $l_{\text{aktuální}}$ je délkový údaj získaný měřením vlhkého vzorku v mm – údaje se získá měřením na zkušebních vzorcích,

l_0 je délkový údaj získaný měřením vysušeného vzorku v mm – údaj najdete v tabulce č. 3 níže,

$l_{\text{základní}}$ je délka rozteče mezi zapuštěním dilatometrických koncovek do vzorků, která je rovna 108mm,

$e_{\text{aktuální}}$ je délkový údaj získaný aktuálním měřením etalonu v mm na počátku měření

e_0 je délkový údaj získaný měřením etalonu po vysušení vzorků v mm (etalon 1: $e_0 = 13,806$ mm; etalon 2: $e_0 = 9,994$ mm)

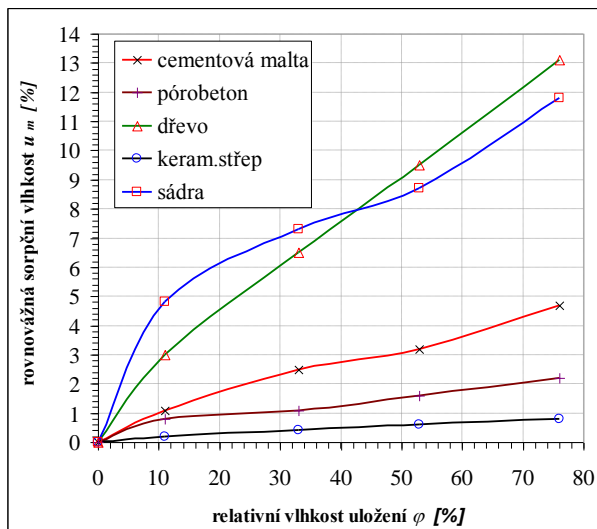
Hodnoty veličin měřených ve vysušeném stavu m_0 , l_0 a e_0 pro jednotlivé zkušební vzorky jsou uvedeny v tabulce č. 3 níže.

Z naměřených a vypočtených hodnot sestrojte následující grafy:

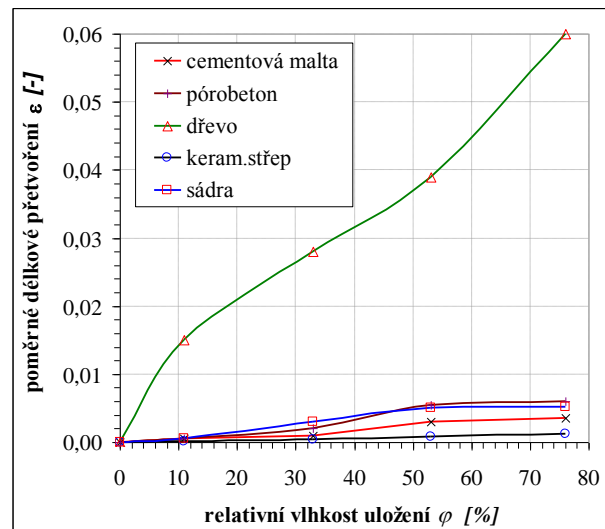
- 1) průběh sorpční izotermy pro všechny tři zkoumané materiály, která vyjadřuje závislost hmotnostního obsahu vlhkosti u_m na relativní vlhkosti vzduchu φ dle příkladu na obrázku níže,
- 2) závislost poměrného délkového přetvoření ε zkušební vzorku na relativní vlhkosti vzduchu φ pro všechny tři zkoumané materiály dle příkladu na obrázku níže,
- 3) závislost poměrného délkového přetvoření na rovnovážné hmotnostní vlhkosti vzorků pro všechny tři zkoumané materiály dle grafů níže.

Při vyhodnocování lze zanedbat teplotní délkovou roztažnost vzorků neboť to dovoluje stabilní teplotní klima udržované v laboratořích stavební fyziky v rozmezí $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

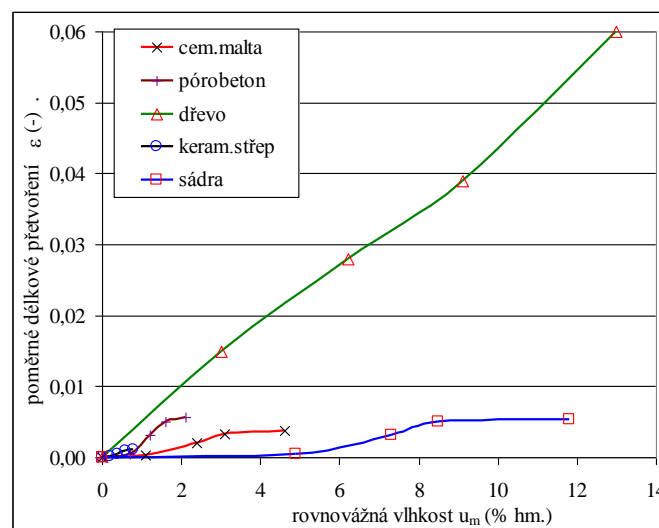
Po provedení grafického výstupu formulujte slovní závěr, kterým popíšete výsledky měření a případné odchylky od předpokládaných výsledků.



Graf sorpčních izoterm (příklad výstupu ze cvičení)



Graf závislosti poměrného délkového přetvoření vzorků na relativní vlhkosti uložení (příklad výstupu ze cvičení)



Graf závislosti poměrného délkového přetvoření na rovnovážné hmotnostní vlhkosti vzorků (příklad výstupu ze cvičení)

Příloha

Konstanty etalonů: etalon 1: $e_0 = 13,806$ mm; etalon 2: $e_0 = 9,994$ mm

Tab. č. 3: Hodnoty veličin měřených ve vysušeném stavu m_0 , l_0 a e_0 pro jednotlivé zkušební vzorky:

sádra	č.vz.	$m_0[g]$	$l_0[mm]$	cement. pasta	č.vz.	$m_0[g]$	$l_0[mm]$
	1	299,51	12,292		1	412,37	11,375
	2	301,64	14,878		2	420,39	12,108
	3	296,41	9,748		3	416,10	11,993
	4	300,34	12,383		4	417,51	13,819
	5	298,70	10,042		5	415,65	11,856
	6	296,99	10,175		6	416,85	14,045
	7	297,44	11,139		7	417,70	14,164
	8	295,92	11,658		8	411,15	12,702
	9	298,36	14,222		9	406,32	11,854
	10	297,16	14,755		10	414,78	11,563
	11	300,60	16,345		11	412,97	11,921
	12	299,19	11,261		12	418,24	12,464

dřevo	č.vz.	$m_0[g]$	$l_0[mm]$	pórobeton	č.vz.	$m_0[g]$	$l_0[mm]$
	1	120,80	6,146		1	81,13	10,250
	2	121,21	5,757		2	81,35	9,157
	3	120,79	4,597		3	83,52	9,814
	4	123,05	5,283		4	80,87	9,955
	5	120,46	5,144		5	80,22	9,816
	6	119,64	7,168		6	82,37	12,077
	7	120,54	5,282		7	79,87	9,376
	8	120,62	5,424		8	82,17	9,949
	9	119,05	5,853		9	83,69	10,358
	10	121,37	6,979		10	82,23	11,316
	11	118,65	6,652		11	82,70	9,717
	12	121,29	6,073		12	81,75	9,916

keram. střep	č.vz.	$m_0[g]$	$l_0[mm]$
	1	434,66	11,392
	2	433,88	11,052
	3	429,20	10,850
	4	425,53	11,959
	5	435,79	13,002
	6	432,66	12,962
	7	434,83	12,313
	8	432,69	12,451
	9	442,47	14,184
	10	437,21	12,786
	11	432,70	12,176
	12	438,31	12,384

4.b. Měření vlhkosti vzduchu psychrometrickou metodou

Pro *stanovení stavu vzduchu* jsou nutné tři veličiny: dvě stavové (např. teplota a tlak) a jedna vyjadřující složení vzduchu (jeho vlhkost). Vlhkost vzduchu lze vyjádřit řadou parametrů, nejčastěji se však vyjadřuje veličinami, které lze přímo měřit. Je to teplota mokrého teploměru (resp. z ní získané veličiny, parciální tlak vodních par p_D a relativní vlhkost φ) a teplota rosného bodu.

Pro *nepřímá měření vlhkosti* lze využít i fyzikální vlastnosti různých materiálů, které se mění s vlhkostí. Jsou to zejména:

- Délkové změny některých materiálů v závislosti na relativní vlhkosti (vlasové, resp. blánové vlhkoměry),
- Závislosti elektrické vodivosti citlivé vrstvy čidla na vlhkosti (lze využít i jiných vlivů vlhkosti na elektrické veličiny, např. kapacitu kondenzátorů apod.),
- Absorpce vlhkosti průchodem vrstvou absorpční látky.

1) Vyjádření vlhkosti vzduchu

Veličin určujících vlhkost vzduchu je řada. Jsou vztaženy k celkovému tlaku vzduchu a jeho teplota (tlak vzduchu se stanovuje jako normální tlak podle příslušné nadmořské výšky, pro ČR jeho průměrná hodnota činí 98,1 kPa, tj. 735 torrů). Mezi hlavní veličiny patří:

- absolutní vlhkost vzduchu*, je to hmotnost vodních par v 1 m^3 prostoru neboli měrná hmotnost par ρ_D .
- parciální tlak vodních par ve vzduchu* p_D , zůstává při změně teploty stálý.
- relativní (poměrná) vlhkost vzduchu* φ , v praxi se často používá a udává do jaké míry je vzduchu parou nasycen.
- měrná vlhkost vzduchu (vodní obsah)* x , vyjadřuje hmotnost vodní páry připadající na 1 kg suchého vzduchu (kg / kg s.v.). Ve vzduchotechnických výpočtech je nejběžnější veličinou.
$$\text{nou. } x = \frac{M_D}{M_L} = \frac{V \cdot \rho_D}{V \cdot \rho_L} = \frac{R_L \cdot p_D}{R_D \cdot p_L} \doteq 0,622 \frac{p_D}{p - p_D} = 0,622 \frac{\varphi p_D}{p - \varphi p_D}.$$
- hmotnostní podíl páry ve vzduchu* ξ , hmotnost vodní páry připadající na 1 kg vlhkého vzduchu:
$$\xi = \frac{M_D}{M_L + M_D} = \frac{x}{1 + x}.$$
 Tato veličina se používá v sušárenství.
- teplota rosného bodu* θ_w , je teplota, při níž jsou páry ve vzduchu právě syté (vzduchu je vodní parou nasycen). Na povrchu zrcátka, které má přibližně tuto teplotu, nastává kondenzace par.
- teplota mokrého teploměru* θ_m , je teplota, kterou má v rovnovážném stavu teploměr obalený tzv. mokrou punčoškou při nuceném proudění vzduchu. Blíží se fyzikálně definované *teplotě mezního adiabatického ochlazení* θ_{ad} , což vyjadřuje teplotu vodní lázně, při níž je všechno teplo při izobarickém odpařování vody z vodní hladiny dodáno konvekcí ze vzduchu.

2) Měření vlhkosti vzduchu mokrým teploměrem

Při vzájemném styku vody a vzduchu v tepelně izolované soustavě (mokrému povrchu se nesdílí žádné teplo sáláním) při izobarickém procesu lze najít takovou teplotu vody, při níž teplo potřebuje k vypařování vody vzduchu je odebíráno přestupem tepla konvekcí ze vzduchu. Při tomto procesu se teplota vodní lázně nemění. Tato teplota se označuje jako mezní teplota adiabatického ochlazení θ_{ad} . Za těchto předpokladů lze určit v empirické psychrometrické Sprungově rovnici psychrometrický součinitel A_{ad} . Psychrometrická rovnice nabývá tvaru:

$$\rho_D = \rho''_{Dm} - A \cdot p \cdot (\theta - \theta_m),$$

kde: p_D, p''_{Dm} parciální tlak vodní páry ve vzduchu a tlak sytých vodních par při teplotě mokrého teploměru [Pa],

p	celkový tlak vzduchu (barometrický tlak) [Pa],
A	psychrometrický součinitel,
$\theta - \theta_m = \Delta\theta$	rozdíl teplot suchého a zvlhčeného teploměru [K].

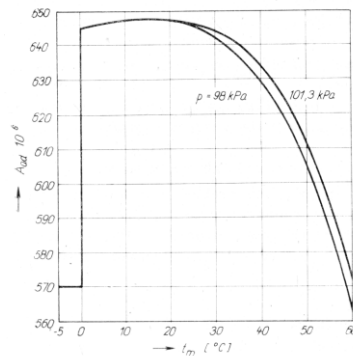
Hodnoty A_{ad} jsou uváděny grafickou závislostí. Údaj mokrého teploměru však neodpovídá idealizované hodnotě t_{ad} v důsledku odchylek při přestupu tepla a přenosu hmoty od předpokládané analogie. Lze odvodit, že pro skutečný psychrometrický součinitel A platí

$$A = A_{ad} \left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_k} \right) L,$$

kde α_s, α_k jsou součinitele přestupu tepla sáláním a konvekcí $L = \alpha_k / \beta_x \cdot c_L$. Součin $(1 + \alpha_s / \alpha_k) \cdot L$ se liší u aspiračního psychrometru jen nepatrně od 1, takže lze brát $A = A_{ad}$.

$$A_{ad} \cong \frac{c_L \cdot (p - p''_{Dm})}{0,622 \cdot l_m \cdot p} \left(1 + \frac{0,136 \cdot p''_{Dm}}{p} \right),$$

kde: c_L měrné teplo vzduchu [$1010 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 p''_{Dm} parciální tlak sytých vodních par při teplotě mokrého teploměru [Pa],
 l_m skupenské teplo, výparné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].



Hodnoty A_{ad} v závislosti na teplotě mokrého teploměru

Při měření mohou vznikat chyby z nesprávného měření. Je-li teploměr v dobrém stavu, mohou mít *chyby* tento původ:

- v punčošce* - punčoška není dostatečně vlhká. Tyto chyby může způsobit i punčoška z nevhodného špatně smáčivého materiálu.
- ve smáčecí vodě* - ke smáčení punčošky je třeba používat vždy destilovanou vodu.
- v tepelných vlastnostech teploměru* - v tomto případě je třeba použít teploměru s co nejnižší tepelnou kapacitou.

Hlavní nedostatky psychrometrických měření jsou:

- malá přesnost při nízkých relativních vlhkostech a nízkých teplotách,
- nutnost zajistit dostatečné proudění kolem mokré baňky,
- nutnost udržovat dostatečné navlhčení punčošky,
- pomalost měření při použití rtuťových teploměrů,
- (nutnost měření barometrického tlaku).

K výhodám patří:

- jednoduchost měřícího zařízení,
- dostatečná přesnost pro technickou praxi,
- při běžných měřeních není nutné žádné přecejchování za předpokladu, že teploměry jsou shodně cejchovány.

3) Měření vlhkosti vzduchu pomocí teploty rosného bodu θ_w

Při ochlazování vlhkého vzduchu začíná při určité teplotě kondenzovat páru obsažená ve vzduchu. Teplota na počátku orosování se nazývá teplota rosného bodu θ_w . Orosování nastává na povrchu, jehož teplota je nižší než teplota θ_w . Relativní vlhkost vzduchu φ je:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

Orosování povrchu je děj komplikovaný. Měřením elektrického odporu izolačních materiálů při orosování bylo prokázáno, že v první etapě je povrchová blána kondenzátu tak tenká, že molekuly kapaliny jsou v oblasti přitažlivosti molekul pevného povrchu. V druhé etapě se tloušťka blány zvětšuje tak, že musí být v rozsahu přitažlivých sil na povrchu, formuje se povrchové napětí kapaliny. V poslední etapě povrchové napětí přesáhne síly přitažlivosti povrchu a začínají vytvářet jednotlivé kapky. Tlak vodních par nad zakřiveným povrchem je vyšší než nad rovinným povrchem a v důsledku toho nastává určité snížení měřené teploty rosného bodu oproti skutečnosti.

Při ruční obsluze vlhkoměru se teplota rosného bodu stanoví tak, že se měří teplota, kdy kondenzace počíná a potom teplotu, kdy nastane opět úplné vysušení zrcátka, jehož orosení se sleduje.

Pracovní postup stanovení vlhkosti vzduchu psychrometrickou metodou

1. Psychrometr se vyjme z kufříku, horní díl psychrometru s hodinovým strojkem a ventilátorem se odšroubuje. V tomto stavu lze oba teploměry (tzv. suchý i mokrý teploměr) vyjmout.
2. Vyjme se mokrý teploměr s punčoškou a namočí v zásobní lahvičce s destilovanou vodou. Musí být dosaženo nasycení textilního obalu teploměru (punčošky), voda však nesmí po punčošce stékat.
3. Mokrý teploměr se vloží zpět do psychrometru a zašroubuje se jeho horní díl s ventilátorem. Při měření nesmí být vzduch nasávaný trubicemi ve spodní části přístroje ovlivněn lokálními okolními teplotami, proto se přístroj zavěsí do držáku.
4. Po natažení hodinového strojku ventilátoru je připraven psychrometr k měření.
5. V jedeminutových intervalech se odečítají zároveň obě teploty, teplota suchého teploměru t_s a teplota mokrého teploměru t_m , po dobu chodu hodinového strojku.
6. Ze souboru měřených teplot se k vyhodnocení použije ustálených hodnot.

Vyhodnocení měření

K výpočtu se použije ustálených hodnot teplot. Stanoví se tzv. psychrometrická diference

$$\Delta\theta = \theta_s - \theta_m.$$

V tabulkách nebo výpočtově se přiřadí pro teplotu vzduchu (suchého teploměru θ_s) a psychrometrickou diferenci $\Delta\theta$ odpovídající relativní vlhkost vzduchu φ . Podle psychrometrické rovnice se vyjádří parciální tlak vodní páry p_D a odpovídající vlhkost vzduchu.

Pro výpočet parciálního tlaku nasycené vodní páry p_D'' (Pa) lze s velmi příznivou aproximační přesností využít vztahu:

$$p_D''(\theta) = \exp\left(\frac{a\theta + b}{c + \theta}\right) \quad \begin{cases} \theta < 0^\circ\text{C} & a = 28.9205; b = 1751.21042; c = 273 \\ \theta \geq 0^\circ\text{C} & a = 23.589991; b = 1513.86688; c = 236 \end{cases}$$

$$\text{resp. } \theta = \frac{b - c \cdot \ln p_D''}{\ln p_D'' - a}$$

5. Zjišťování rozložení teplot v teplotním poli elektroanalogickou metodou

Metoda stanovení:

Pomocí elektrické analogie lze studovat neustálené vedení tepla, sdílení tepla místností za podmínek letního i zimního klimatu, zkoumat tepelně – akumulační pochody atp. Předpokladem řešení elektrického modelování je, že děje v tepelné a elektrické soustavě mají stejnou diferenciální rovnici.

$$\text{Pro tepelný tok platí : } dP = -\lambda \frac{\delta t}{\delta x} \cdot dS \quad (\text{W})$$

$$\text{Pro elektrický tok platí : } dI = \gamma \frac{\delta U}{\delta x} \cdot dS \quad (\text{A})$$

Kde:

dP – tepelný tok (W)

dI – elektrický tok (I)

λ - součinitel tepelné vodivosti (W/m.K)

γ - součinitel elektrické vodivosti (S/m)

$\frac{\delta \theta}{\delta x}$ - diference teplotního spádu (K/m)

$\frac{\delta U}{\delta x}$ - diference spádu napětí ve směru normály (V/m)

dS – diference plochy (m²)

Časově proměnné faktory mohou být sledovány i v závislosti na různém uspořádání tepelného mostu. Elektromodelováním sledujeme rozdělení potenciálu v elektrostatickém poli, což je analogické rozložení teplot v poli teplotním. Elektrický model představuje síť, kde jsou mezi uzly ohmické odpory přímo úměrné tepelným odporům příslušných vrstev. Síť může být doplněna kapacitními složkami, které představují elektrické kondenzátory paralelně vřazené k ohmickým odporům, takže je respektován vliv tepelné akumulace materiálu, neboť elektrický náboj v elektrické síti představuje určité množství tepelné energie.

Popis měřícího zařízení :

K provedení laboratorního cvičení je k dispozici elektrický model, který byl vyroben pro sledování plošného teplotního pole rohové části obvodového pláště budovy. Na vstupní svorky modelu se připojí napájecí napětí ze stejnosměrného zdroje, které je úměrné rozdílu teplot ($\theta_i - \theta_e$) na skutečném díle. Po připojení napětí se vytvoří elektrické pole, které můžeme v jeho uzlových bodech sledovat vhodným voltmetrem, který má dostatečně vysokou vstupní impedanci. V opačném případě by totiž vnitřní odpor měřidla ovlivňoval odporovou síť v elektrickém modelu a naměřené potenciály by se lišily od skutečných.

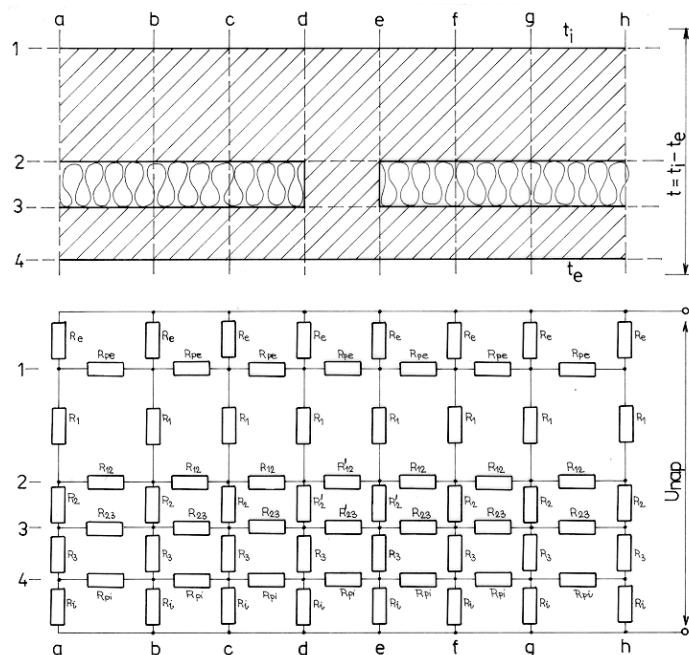


Schéma části stavební konstrukce a jemu odpovídající náhradní elektrické zapojení

Postup při stanovení:

Rozdíl potenciálů odečítáme na měřidle po přeložení měřícího hrotu ke svorce uzlu; druhý hrot je připojen k napětí U_i , respektive U_e . Odečtené hodnoty zapisujeme do tabulky v protokolu. Pro výpočet teplot je třeba také zjistit svorkové napětí zdroje, které je analogické teplotnímu spádu na konstrukci. Po konverzi naměřených potenciálů na teploty se vyznačí teploty uzlových bodů do schématu konstrukce ve vhodném měřítku a vykreslí se rovněž potřebné teplotní izotermy např. po 1, 2 a 5 K.

Vyhodnocení:

Teplotní pole zadaného tepelného mostu, resp. stavebního fragmentu, se vykreslí teplotními izoliniemi do jednoduchého schématu. Pro cvičení budou udány tři teploty, které se vykreslí nejlépe odlišnými barvami.

6. Stanovení tepelných mostů v konstrukci metodou infračervené termografie

Metoda stanovení:

Jako tepelné mosty jsou označovány ohraničená místa stavební konstrukce, která vykazují ve srovnání s ostatními částmi stavební konstrukce vyšší hodnotu hustoty tepelného toku. Tyto lokálně zvýšené hodnoty hustoty tepelného toku způsobují nejen zvýšení tepelných ztrát oproti ostatním částem konstrukce, ale dochází i ke snížení povrchové teploty v postižené oblasti stavební konstrukce.

V praxi mají tedy vzniky tepelných mostů tyto základní důsledky:

- zvýšení tepelných ztrát,
- snížení povrchové teploty v okolí tepelného mostu.

Pro stanovení a lokalizaci tepelných mostů bude použito metody termovizního měření rozložení teplot po povrchu stavební konstrukce. Při termovizním měření (stavební termografii) se vyhodnocuje dopadající záření v oblasti infračerveného spektra a získává se viditelná informace (tzv. termogram) o rozložení teplot na povrchu konstrukce. Převážná většina zobrazovacích systémů (zařízení) využívá jako signál k přenosu informací elektromagnetické vlnění v oblasti dlouhovlnného infračerveného vlnění. Zařízení transformuje 3D scénu na obrazový tok, který je schopen vyvolat zrakový vjem.

Skutečnost, že radiace neboli vyzařování, je funkcí povrchové teploty objektu, umožňuje termovizní kameře tuto teplotu vypočítat a zobrazit. Aby byla přesně změřena teplota, je nezbytné nastavit na kameře další parametry objektu a prostředí, v němž je prováděno měření. Jedná se o tyto hlavní parametry:

- emisivita povrchu objektu,
- teplota okolí,
- vzdálenost mezi objektem a kamerou,
- relativní vlhkost.

Emisivita je vlastností povrchu, která je definována jako poměr intenzity vyzařování tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa při stejné teplotě. Je obvykle dána tabulkovou hodnotou zjištěnou při určité teplotě a vlnové délce. Emisivita vyzařování běžných materiálů z povrchu objektů se pohybuje přibližně od 0,80 do 0,98. Hodnoty emisivit některých stavebních materiálů jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4: Hodnoty emisivit ε vybraných materiálů jež se používají ve stavebních konstrukcích:

Materiál	ε [-]
Hliník leštěný	0,05
Hliník drsný	0,07
Hliník oxidovaný	0,20 - 0,30
Dřevo	0,90
Střešní lepenka	0,93
Beton suchý	0,95
Žula přírodní	0,96
Cihla obkladová	0,92
Omítka	0,91

Předpokladem pro zjištění rozložení teplotního pole na povrchu konstrukce v oblasti tepelných mostů (pro jejich jednoznačnou lokalizaci a vyhodnocení) je:

- Existence tepelného toku, tzn. teplotní rozdíl mezi vnitřním a vnějším prostředím musí být dostatečně velký, aby umožnil zjistit tepelné nepravidelnosti, min. 10 K. Ideální rozdíl na základě zkušeností je však 20 K.
- Rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou má být konstantní po dobu 12 - 24 hodin před měřením.
- Vyloučení vlivu slunečního záření po dobu 12 hodin před začátkem měření.

Popis měřicího zařízení:

Po laboratorní měření bude použita ruční termovizní kamera s detekcí infračerveného záření v rozmezí 7,5 – 13 μm , dále měřidlo pro stanovení teploty a relativní vlhkosti vzduchu (digitální teploměr/vlhkoměr), svinovací metr, laserový dálkoměr.

Postup při stanovení:

Před započítím samotného měření je nutné zvolit vhodný fragment obvodového pláště, na kterém bude měření provedeno. Je nutné zjistit rozměry jednotlivých částí zkoumané části obvodové konstrukce a zaznamenat si její přesný tvar a rozměry. Stanovení rozměrů bude provedeno pomocí svinovacího metru a laserového dálkoměru.

Dále bude provedeno stanovení teploty θ_a [$^{\circ}\text{C}$] a relativní vlhkosti vzduchu φ_i [%] v místnosti, ve které je prováděno měření (dveře i okna místnosti musí být zavřená). Měření je nutné provést ve středu místnosti ve výšce 1,0 – 1,5 m nad úrovní podlahy.

Následně bude pomocí termovizní kamery proveden počáteční průzkum povrchu stavební konstrukce. Jedná se o pasportizaci povrchových teplot na vnitřním povrchu stavební konstrukce, která se provádí z větší vzdálenosti a jejímž cílem je vytipování míst s nízkou povrchovou teplotou, ve kterých jsou lokalizovány tepelné mosty.

Pro účely cvičení budou zvolena 3 místa konstrukce, kde budou naměřeny nejnižší povrchové teploty. V těchto místech bude provedeno podrobné stanovení povrchových teplot ze vzdálenosti 1,0 – 1,5 m. Postup stanovení povrchových teplot je následující:

- termovizní kamera musí být přepnuta do měřicího stavu Min Area – registrace nejnižší teploty měřicí ploše,
- na termovizní kameře musí být nastavena emisivita příslušného druhu povrchu konstrukce (viz. tab. 2),
- termovizní kamera se namíří na zkoumaný detail stavební konstrukce, v případě kamery E4 je nutné obraz pomocí optiky v přední části se doostřit (termovizní kamera i7 má pevnou optiku, proto doostřování není nutné).



Fotografie termovizní kamery Flir ThermoCAM E4



Fotografie termovizní kamery Flir ThermaCAM i7

- odečte se nejnižší zjištěná povrchová teplota a snímek se uloží pomocí tlačítka „SAVE“.

Dále proběhne prohlídka konstrukce ze strany exteriéru. Bude provedeno stanovení vnější teploty a relativní vlhkosti. V závěru bude provedeno termovizní snímkování vybraných detailů (tepelných mostů) z exteriéru dle níže uvedeného postupu, přičemž měřicí mód na termovizní kameře bude Max Area – registrace nejvyšší teploty v měřicí ploše. Budou odečteny a zaznamenány nejvyšší vnější povrchové teploty ve zvolených detailech a termovizní snímky těchto tří detailů budou archivovány (viz. výše) v termovizní kameře.

Vyhodnocení:

Na základě zjištěných rozměrů a geometrie vyšetřované stavební konstrukce se sestaví náskres, ve kterém budou zaznačeny 3 vybrané oblasti, v nichž byly lokalizovány tepelné mosty a provedeno podrobné měření.

Na základě naměřených povrchových teplot budou vypočítány tepelné odpory konstrukce R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] v místech tepelných mostů dle vztahu (Výpočtové parametry prostředí: $h_e = 23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ $h_i = 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$):

$$R = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se}) R_i}{(\theta_i - \theta_{si})} \text{ nebo } R_0 = \frac{(\theta_i - \theta_e) R_i}{(\theta_i - \theta_{si})} \text{ kde pak } R = R_0 - R_i - R_e$$

- kde:
- θ_{si} – vnitřní povrchová teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 - θ_{se} – vnější povrchová teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 - θ_i – teplota vnitřního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 - θ_e – teplota vnějšího vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 - R_i (R_e) – tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřním (vnějším) povrchu kce. [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 - R_0 – tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla na vnitřním povrchu konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$].

Následně bude proveden výpočet vnitřních povrchových teplot pro návrhovou teplotu vnějšího vzduchu $\theta_e = -15,0^{\circ}\text{C}$. Pro výpočet budou použity příslušné vypočítané hodnoty tepelných odporů.

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{(\theta_i - \theta_e) R_i}{R_0}$$

Dále budou stanoveny teploty rosného bodu pro naměřené hodnoty teploty a relativní vlhkosti vnitřního vzduchu. Nejprve se na základě naměřené teploty vnitřního vzduchu θ_a stanoví hodnota parciálního tlaku nasycené vodní páry p_d'' [Pa]:

$$p_d'' = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot \theta_a}{237,3 + \theta_a}\right) \quad \text{pro teplotu vzduchu } \theta_a \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

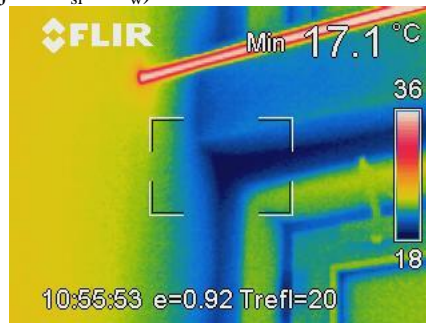
$$p_d'' = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot \theta_a}{265,5 + \theta_a}\right) \quad \text{pro teplotu vzduchu } \theta_a < 0$$

A následně se stanoví teplota rosného bodu θ_w [$^\circ\text{C}$]:

$$\theta_w = \frac{237,3 \cdot \log_e \left[\frac{\varphi_i \cdot p_d''}{61050} \right]}{17,269 - \log_e \left[\frac{\varphi_i \cdot p_d''}{61050} \right]} \quad \text{pro } p_d'' \geq 610,5 \text{ Pa}$$

$$\theta_w = \frac{265,5 \cdot \log_e \left[\frac{\varphi_i \cdot p_d''}{61050} \right]}{21,875 - \log_e \left[\frac{\varphi_i \cdot p_d''}{61050} \right]} \quad \text{pro } p_d'' < 610,5 \text{ Pa}$$

V závěru bude posouzeno, zda bude v daných detailech docházet ke kondenzaci vzdušné vlhkosti nebo nikoliv (ke kondenzaci dochází, je-li $\theta_{si} < \theta_w$).



Termografická fotografie tepelného mostu v oblasti překladu nad dveřmi

7. Kontinuální měření součinitele difúze vodní páry

Úvod:

a) Proces difúze vodní páry v pórovitém prostředí stavebních hmot

Příčina vzniku difúzního procesu ve svém jádře vychází ze zákona zachování energie. Přírodní zákony jsou postaveny tak, že je jejich neustálou snahou docílit rovnovážného energetického stavu, přičemž množství hmoty můžeme přeneseně pokládat za projev energetického množství. Proto pokud se vyskytnou dvě plynná prostředí s odlišnými koncentracemi vodní páry c , pak nutně začne docházet k vyrovnávání tohoto rozdílu.

Příkladem z běžné životní i stavební praxe je vzduchové prostředí obývané místnosti s vysokým obsahem vodní páry např. koupelny a prostředí venkovního ovzduší, kde jsou tato prostředí oddělená obvodovou zděnou stěnou. V tomto případě, jsou obě plynná prostředí oddělena přepážkou s otevřeným pórovitým systémem, a začnou se tedy molekuly vodní páry šířit tímto pórovým systémem v obou směrech. Přičemž větší tok molekul vodní páry (difúzní tok) se bude realizovat z prostředí s vyšší koncentrací do prostředí s nižší koncentrací vodní páry. Difúzi lze tedy obecně označit za pronikání látky látkou.

Šíření vodní páry v pórovém prostředí procesem difúze je analogické šíření tepla vedením v pevné látce a vždy je s procesem vedení tepla úzce spojeno. Za stacionárního stavu lze šíření vodní páry difúzí pórovitým prostředím popsat následujícím vztahem:

$$q_d = -\delta \cdot \text{grad } p_d \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}],$$

kde q_d je hustota difúzního toku a $\text{grad } p_d$ je gradient parciálních (částečných) tlaků vodní páry v Pascalech. Součinitel δ je hlavní materiálovou charakteristikou popisující schopnost materiálu umožňovat průchod skrz sebe vodní páře prostřednictvím difúze. Tuto veličinu δ nazýváme součinitel difúzní vodivosti pro vodní páru a uvádíme ho v sekundách.

Nejvyšší hodnoty δ ze všech známých materiálů a tedy i největší propustnosti pro vodní páru nabývá vzduch, který má při 10°C součinitel difúzní vodivosti vzduchu: $\delta_{vzd, \theta=+10^\circ\text{C}} = 0,18824 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

Součinitel difúzní vodivosti vzduchu je funkčně závislý především na teplotě vzduchu a atmosférickém tlaku. Nicméně, tyto závislosti a rozdíly dosahují při běžných klimatických podmínkách malých hodnot, proto jsou při stavebně-technických výpočtech zanedbatelné.

Vzhledem k velmi malým hodnotám součinitele difúzní vodivosti a tedy jeho nepraktičnosti se ve stavební praxi často používá vyjádření difúzní vodivosti materiálů, zejména zdících prvků, omítek a parozábran, pomocí faktoru difúzního odporu μ . Tato veličina udává kolikanásobně je materiál nepropustnější pro vodní páru než-li vzduchová vrstva o stejné tloušťce. Stanovit ho lze dle následujícího vztahu.

$$\mu = \frac{\delta_{vzd}}{\delta} \quad [-]$$

Je tedy zřejmé, že faktor difúzního odporu může nabývat hodnot od 1 do velmi vysokých hodnot, které se u polymerních a živičných izolací pohybují v řádech stovek tisíc. V případě skel a kovů je faktor difúzního odporu teoreticky nekonečný. Přehled hodnot δ a μ vybraných stavebních materiálů uvádí tabulka 5.

Tab. 5: Orientační hodnoty součinitele difúzní vodivosti a faktoru difúzního odporu pro vybrané stavební hmoty (dle ČSN 730540)[1].

Materiál	δ [s · 10 ⁻⁹]	μ [-]
omítka vápenná	0,031	6
beton prostý hutný ($\rho_v=2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0,009	20
pěn. polystyren (EPS)	0,0047-0,002	40 - 95
dřevo kolmo na směr vláken	0,012	157
PE fólie	0,000015 – 0,000007	12 500 - 27 000
butylkaučuk fólie	0,00000062	304 000

Pro vyjádření difúzní vodivosti nátěrových hmot se velmi často používá veličina r_d , čili ekvivalentní difúzní tloušťka, kterou získáme z vztahu:

$$r_d = \mu \cdot d \quad [\text{m}],$$

kde d je fyzická tloušťka materiálové vrstvy. Tato ekvivalentní difúzní tloušťka vyjadřuje, jak mocná by musela být vrstva vzduchu, aby měla stejný odpor proti propouštění vodní páry jako materiálová vrstva o dané tloušťce.

Ve výpočtech stavební fyziky ke kvantifikaci vzdušné vlhkosti běžně nevyužíváme veličinu koncentrace c uváděné v kg vodní páry na m³ suchého vzduchu, ale parciální tlak vodní páry p_d , který lze stanovit dle následujícího vztahu:

$$p_d = c \cdot R_D \cdot T \quad [\text{Pa}],$$

kde zbývající veličiny R_D a T označují speciální plynovou konstantu vodní páry $R_D = 462 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, a termodynamickou teplotu vzduchu v Kelvinech.

Je nutno zdůraznit, že difúze není jediným způsobem, jakým se může vodní pára šířit pórovým systémem materiálu. Jako další možnosti transportu lze uvést např. povrchovou difúzi a efúzi. [2]

b) **Metody laboratorního stanovení součinitele difúzní vodivosti**

Miskové metody (stacionární stav)

Za nejčastější postupy stanovení součinitele difúzní vodivosti lze označit miskové metody, tedy metodu suché misky a metodu mokré misky (dry cup a wet cup method).

Metoda suché misky spočívá v umístění deskového vzorku o známé ploše i tloušťce do skleněné či kovové misky při utěsnění okrajů mezi vzorkem a miskou (viz obrázek níže). Na dně misky je pomocí vysoušedla vytvořena nízká koncentrace vodní páry ve vzduchu a celý vzorek je udržován v prostředí s vysokým definovaným obsahem vlhkosti ve vzduchu. Celý děj je stabilizován stálou teplotou a díky tomu dojde v určitém časovém rozpětí ke stacionárnímu difúznímu toku skrz zkoumaný vzorek. Z příbytků hmotnosti misky, které jsou zjišťovány průběžným vážením misky během experimentu, jsou vypočítány difúzně-materiálové charakteristiky vzorku.

Při alternativní metodě mokré misky dochází k obrácení směru difúzního toku, protože definované vlhké prostředí je udržováno v misce pod vzorkem pomocí vody nebo solného roztoku. Celá miska je umístěna v prostředí s nízkou relativní vlhkostí, dochází proto k postupnému úbytku hmotnosti misky vlivem prodifundování vlhkosti skrze vzorek do okolního vzduchu.

Výsledky obou metod však nelze považovat za ekvivalentní. Naměřené hodnoty součinitelů difúzní vodivosti stejných materiálů dosahují různých hodnot, což je principiálně spojeno s odlišným sorpčním a desorpčním chováním materiálů. Proto je třeba vždy uvádět, jaké zkušební metody bylo pro stanovení použito.

Tranzientní metody (nestacionární stav)

Pro stanovení difúzních i sorpčních vlastností stavebních hmot lze využít i metod tranzientních, při kterých nedochází k ustavení stacionárního stavu. Jejich výhodou je zjištění funkční závislosti součinitele difúzní vodivosti na relativní vlhkosti okolí a dále možnost změření sorpční izotermy při jediném experimentu. Nevýhodou je daleko náročnější uspořádání měřicího zařízení a netriviální matematické vyhodnocení naměřených hodnot.

Jako příklad těchto metod lze například uvést tzv. Rychlou tranzientní metodu. Při tomto měření je deskový vzorek s definovanou plochou a tloušťkou umístěn mezi dvě vzduchotěsné komory. V jedné komoře je udržován vzduch ve stavu nasycení pomocí misky s vodou a ve druhé komoře je relativní vlhkost vzduchu udržována blízká nule pomocí misky se silikagelem. Po spuštění experimentu dojde k nestacionárnímu difúznímu toku z „vodní“ komory do komory „silikagelové“ skrze vzorek, přičemž je kontinuálně sledována hmotnost obou misek. Ze zjištěných průběhů hmotností misek je funkční závislost $\alpha(\varphi)$ zjištěna řešením diferenciální rovnice isotermického jednofázového transportu vodní páry dle Carslaw a Jaegera [3].

c) Důsledky šíření vodní páry a jejího hromadění ve stavební konstrukci

Hlavní motivací pro stanovování a znalost difúzní vodivosti stavebních hmot je vytváření takových skladeb obvodových konstrukcí budov, které by nevykazovaly poruchové stavy způsobené nahromaděním difundující vlhkosti.

Z projekce pozemních staveb je známa poučka, že při vytváření vrstvených obvodových konstrukcí je třeba postupovat tak, aby difúzní odpor vrstev klesal od vnitřního povrchu místností směrem do venkovního prostředí. V případě, že musí být konstrukce ukončena nebo rozdělena difúzně neprostupnou vrstvou, jako např. u plochých střech, je nezbytné zajistit odvětrání vlhkosti, která by se jinak hromadila pod touto difúzní bariérou.

Pokud nevhodnou skladbou konstrukce zpříčiníme stav, kdy hromadění difundované a následně zkoncentrované vlhkosti překročí možnost odparu vlhkosti z konstrukce během roku, vystavujeme obvodovou konstrukci zejména těmto rizikům:

- Ztráta tepelně-izolačních schopností izolantů i zdiva
- Vznik plísní a nehygienických podmínek v obývaných prostorech
- Napadení organických prvků např. dřevěných trámů houbami a plísněmi
- Narušení soudržnosti konstrukce cyklickým zamrzáním a expanzí ledu v pórech
- Nadměrné objemové změny spojené s příjmem vlhkosti
- Problémy s transportem solí v silikátech (povrchové solné výkvěty síranové rozpínání, karbonátace atd.)
- Zvýšení vlastní tíhy konstrukce

Z hlediska procesu difúze nesledujeme u stavebních hmot pouze jejich difúzní vodivost pro vodní páru. Dalším významným parametrem, zejména betonů a malt, je difúzní vodivost pro oxid uhličitý.

Tento plyn v kombinaci s přítomností vysokého obsahu vlhkosti v pórech cementových kompozitů zapříčiňuje konverzi C-S-H produktů hydratace zpět na postupně expandující CaCO_3 za silného okyšení prostředí kompozitu, který následně ztrácí schopnost chránit ocelovou výztuž pro oxidační korozi.

Metoda stanovení:

Pro výukové stanovení součinitele difúzní vodivosti δ byla zvolena modifikovaná metoda suché misky (dry cup) dle ČSN EN ISO 12572 [4]. Schéma metody je vyobrazeno na obrázku 1. Tato metoda předpokládá vytvoření ustáleného difúzního toku q_d mezi dvěma stranami měřeného vzorku. Toho je docíleno tak, že na jedné straně vzorku je udržován stálý nízký parciální tlak vodní páry způsobený přítomností vyžíhaného silikagelu v misce pod vzorkem a zároveň je celý vzorek i s miskou uložen v prostředí s vyšším parciálním tlakem nasycené vodní páry. Silikagel v misce vyváří velmi nízkou relativní vlhkost blízkou 1% a okolní prostředí si udržuje stálou relativní vlhkost $\varphi=76\%$ díky přítomnosti nasyceného roztoku NaCl v klimatizovaném prostoru.

Aby byly dodrženy příslušné relativní vlhkosti, musí se celé měření se odehrávat za stálé teploty, která je udržována v celém klimatizačním boxu pomocí elektrické teplotní regulace. Teplota experimentálního stanovení je výše uvedenou normou předepsána na 23°C.

Po ustálení klima prostředí a difúzních toků skrz měřený vzorek je součinitel difúzní vodivosti δ následně vypočítán z lineárního přírůstku hmotnosti misky se vzorkem a silikagelem, ve kterém se vlivem tlakového gradientu vodní páry hromadí difundovaná vlhkost. Přičemž je známa tloušťka vzorku a plocha, která je otevřená pro difúzní tok.

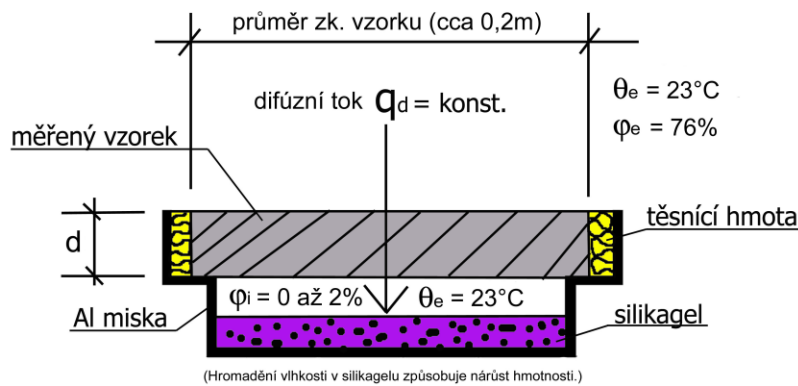


Schéma metody „dry cup“ pro stanovení součinitele difúzní vodivosti

Postup při stanovení:

Kruhové vzorky pro stanovení součinitele difúzní vodivosti ze tří stavebních materiálů obdržíte od vyučujícího cvičení. Pomocí digitálního posuvného měřidla změřte 10x tloušťku každého vzorku a hodnoty si zaznamenejte pro vyhodnocení.

Poté vzorky osadte do kruhových hliníkových misek a po obvodu utěsněte pomocí pistole s těsnícím silikonem. Dbejte na to, abyste důsledně překryli každou netěsnost po obvodu a zároveň nepotřísnili plochu vzorku, kterou bude procházet měřený difúzní tok.

Po osazení do misek změřte 10x průměr kruhové plochy otevřené pro difúzní tok u všech tří vzorků pro následný výpočet.

Prostor v miskách pod vzorkem naplňte vyžíhaným silikagelem, který je připraven v exsikátoru. (Exsikátor mějte otevřený pouze po nezbytně dlouhou dobu, aby nedošlo k jeho saturaci vlhkostí.) Pro plnění použijte otvor ve dně misek a silikagel vsypte pomocí násypky. Po naplnění otvor očistěte od zrnků silikagelu a překryjte lepicí páskou ve dvou vrstvách tak, aby kontakt neobsahoval vzduchové bubliny či „varhánky“.

Takto připravené vzorky můžete již položit do závěsů pod váhami v klimatizačním boxu. Otevřete klimatizační box pomocí čtyř bočních pák. Odepněte závěsy z lanek a vložte misky se vzorky do závěsů a ty znovu zavěste zpět na lanka a zavřete klimatizační box. Poznamenejte si čísla vah, na které jste umístili jednotlivé vzorky materiálů.

Pro spuštění měření vytárujte všechny tři váhy na nulu a na počítači spusťte měření pomocí rozhraní řídicího programu kliknutím na tlačítko „Start klimatizace“ a poté „Start snímání hmotností“.

Teplotní regulátor začne v boxu nastavovat požadovanou teplotu 23°C a začne čtení a zápis hmotností ze všech tří vah v intervalu 5 minut.

Vyhodnocení:

Při následující cvičení si z řídicího PC stáhněte naměřené hodnoty přírůstků hmotností jednotlivých misek. Vyhodnocení proveďte v tabulkovém procesoru např. Excel. Výpočet proveďte pro všechny tři měřené materiály podle těchto kroků:

1) Stanovte hodnoty veličin, které jsou konstantní během celého měření.

- Určete plochu S [m²] a tloušťku d [m] vzorku s využitím aritmetického průměru z naměřených rozměrů.
- Stanovte hodnoty parciálních tlaků vodní páry p_{di} a p_{de} na obou stranách vzorku, když uspořádání experimentu bylo $\theta=23^\circ\text{C}$, $\varphi_i=1\%$ a $\varphi_e=76\%$.

Nejprve určete parciální tlak nasycené vodní páry p_d'' pro teplotu 23°C dle vztahu:

$$p_d'' = e^{\frac{a \cdot \theta + b}{c + \theta}} \text{ [Pa]},$$

kde: a, b, c jsou konstanty (pro $\theta > 0^\circ\text{C}$: $a = 23.589991$, $b = 1513.86688$, $c = 236$).

Poté zkraťte hodnotu p_d'' příslušnou relativní vlhkostí φ dle vztahu:

$$p_d = \frac{p_d'' \cdot \varphi}{100} \text{ [Pa]}.$$

2) Vypočítejte hodnoty difúzních toků mezi jednotlivými váženími.

Výstupem z měření nám jsou data popisující kontinuální přírůstek hmotnosti misky po časových intervalech 5min. Každou dílčí hodnotu difúzního toku q_d v jednotlivých intervalech lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$q_d = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$$

Kde Δm je rozdíl hmotnosti misky ve vypočítávaném kroku s hmotností misky v předchozím kroku v kg, S je plocha vzorku v m² a τ je časový úsek mezi měřeními, tedy 300 sekund.

Je třeba si uvědomit, že hodnoty difúzních toků na počátku experimentu nejsou regulérní. Dochází totiž ještě po nezanedbatelně dlouhou dobu ke stabilizování teploty i relativní vlhkosti v klimatizační komoře i k ustalování vlhkostního pole uvnitř vzorku. Z počátku se tedy nejedná o stacionární stav. Pro vyhodnocení a výpočet součinitele difúzní vodivosti je proto nutno brát až hodnoty difúzních toků, které můžeme považovat za konstantní. To znamená, že se tyto toky od svého aritmetického průměru neliší o více než 10%.

3) Vypočítejte hodnotu součinitele difúzní vodivosti a faktoru difúzního odporu vzorku.

Součinitel difúzní vodivosti je obecně definován dle následujícího vztahu:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_d} \text{ ([kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}\text{]} = \text{[s]}).$$

My však budeme tento součinitel vyhodnocovat z již vypočítaných hodnot difúzních toků, proto pro výpočet použijeme tuto odvozenou rovnici:

$$\delta = \frac{d \cdot q_d}{\Delta p_d} \text{ [s]},$$

kde d je tloušťka vzorku v metrech a Δp_d je rozdíl parciálních tlaků vodní páry na obou stranách vzorku.

Z dílčích difúzních toků též vypočteme hodnoty faktoru difúzního odporu dle vztahu:

$$\mu = \frac{\delta_{vzd}}{\delta} \text{ [-]}. \quad (\delta_{vzd, \theta=+10^\circ\text{C}} = 0,18824 \cdot 10^{-9} \text{ s.})$$

4) Závěr

Z ustálených hodnot součinitelů difúzní vodivosti a faktorů difúzní vodivosti vypočteme aritmetické průměry, které uvedeme jako výsledek měření. Tento výpočet provedeme pro všechny tři zkoumané materiály.

8. Stanovení materiálové vlhkosti pomocí přímých a nepřímých metod

Úvod:

Znalost materiálové vlhkosti je ve stavební praxi velmi důležitá. Při výstavbě stavebních konstrukcí je často nutné materiálovou vlhkost kontrolovat, regulovat a v některých případech na základě vlhkosti v materiálových vrstvách upravovat časovou posloupnost provádění následujících prací. Jedná se například o výstavbu podlahových konstrukcí, kdy je nutné při provádění nosné podlahové desky zabezpečit (např. v případě cementových potěrů) pomalé vysychání, aby byla umožněna dostatečná hydratace pojiva a nedocházelo k negativnímu výskytu trhlin vlivem objemových změn (spojených se změnou vlhkosti). Následně při pokládce nášlapné vrstvy je nutné kontrolovat zbytkovou vlhkost v podkladních vrstvách, aby nedošlo k pokládce nášlapné vrstvy na vlhký podklad.

Dále se setkáváme s problematikou stanovení materiálové vlhkosti v oblasti stavebních průzkumů a diagnostiky stavu konstrukcí, a to především v souvislosti se sanačními a revitalizačními pracemi. Stanovení materiálové vlhkosti lze v praxi provádět pomocí **destruktivních** nebo **nedestruktivních** metod.

V případě **destruktivních metod** je vlhkost stanovena na vzorku odebraném z konstrukce. Výhodou těchto metod je vysoká přesnost naměřených hodnot. Naopak nevýhodou je nutnost provést zásah do konstrukce, je nutné destruovat povrch konstrukce. Dále pak často není možné provádět stanovení vlhkosti in-situ a měření je většinou časově náročné.

Hlavním zástupcem destruktivních metod je **Gravimetrická metoda** pro stanovení vlhkosti, která je popsána v ČSN EN ISO 12570. Vlhkost se stanoví na odebraném vzorku zvážením, vysušením při definované teplotě (anorganických stavebních materiálů, s výjimkou anhydritu, se jedná o teplotu +105 °C) a následným zvážením ve vysušeném stavu. Vlhkost zjištěná touto metodou se udává jako hmotnostní vlhkost:

$$u_m = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%],$$

kde m_w je hmotnost vlhkého vzorku v gramech a m_0 je hmotnost vysušeného vzorku v gramech.

Mezi další zástupce **destruktivních** metod patří Karbidová metoda. Stanovení vlhkosti je možné provádět na vzorcích odebraných z konstrukce přímo na stavbě. Pro stanovení vlhkosti se používá CM přístroj. Podstatou metody je reakce vlhkosti s karbidem vápenatým, při níž vzniká acetylen, jehož množství se měří tlakoměrem, a z naměřeného tlaku se usuzuje vlhkost vzorku. Stanovená vlhkost se udává v tzv. procentech CM, která se však liší od procent hmotnostní vlhkosti. Obvykle se udává, že hodnota zjištěná karbidovou metodou je asi o 1,8 nižší. Pro přesné určení vlhkosti je však nutná kalibrace měřicího přístroje.

V případě **nedestruktivních** metod se jedná o nepřímé metody, kdy při zkoušce měříme určitou fyzikální veličinu, která se mění vlivem obsahu vlhkosti. Obecně jsou tyto metody založeny na sledování některé z elektrických veličin (odporová metoda, kapacitní metoda, indukční metoda apod.) nebo sledování průchodu jistého typu záření/elektromagnetického vlnění zkušebním vzorkem (například radiometrická metoda dle ČSN 73 1375 nebo mikrovlnná metoda).

Existují však další nedestruktivní nebo semi-destruktivní metody, kdy se vlhkost materiálu usuzuje na základě jistých vlastností konstrukce, jako je například povrchové rozložení teplot (metoda termografická) nebo tenze vodních par nad povrchem. V případě, že je známa sorpční charakteristika daného materiálu, je možné usuzovat jeho vlhkost na základě stanovení relativní vlhkosti v mikrosondě vyvr-

tané do materiálové vrstvy. Materiálová vlhkost se stanoví z naměřené relativní vlhkosti a teploty pomocí kalibrační křivky, která je typická pro jednotlivé druhy materiálů.

Metoda stanovení:

V rámci laboratorního cvičení bude provedeno stanovení kalibrační křivky pro nepřímou metodu stanovení kompenzované vlhkosti pro vybraný stavební materiál. V rámci cvičení bude do vzorků vybraného materiálu uměle vneseno různé množství vlhkosti (celkem se bude jednat o 6 vzorků stejného materiálu, do kterých bude vneseno 0 – 20 % vlhkosti). U těchto vzorků bude provedeno stanovení relativní vlhkosti a teploty pomocí měřicího přístroje Testo 635 s vpichovou mikrosondou pro stanovení kompenzované materiálové vlhkosti a dále na odebraném vzorku bude vždy provedeno stanovení vlhkosti i gravimetrickou metodou dle ČSN EN ISO 12570. Stanovení gravimetrické vlhkosti bude provedeno pomocí sušící váhy. Po ukončení měření budou naměřené údaje vyhodnoceny a bude sestavena kalibrační křivka pro přepočtení relativní vlhkosti na materiálovou vlhkost u daného materiálu (při dané teplotě).

Popis měřicího zařízení:

Stanovení relativní vlhkosti bude provedeno pomocí přístroje Testo 635 s vlhkostní mikrosondou o tloušťce 4 mm osazenou teflonovými krytkami, které ji chrání před znečištěním.



Fotografie přístroje Testo 635 s vlhkostní sondou

Gravimetrické stanovení vlhkosti bude provedeno na odebraných vzorcích pomocí sušících vah Radwag MAC 110.



Fotografie sušících vah Radwag MAC 110

Stanovení hmotnosti suchých vzorků a hmotnosti vody bude provedeno pomocí laboratorních vah s rozlišením 0,01 g.

Další přístroje a pomůcky: kádinka 1000 ml 6 ks, kádinka 200 ml, plastová nádoba o objemu min. 2000 ml, stopky.

Postup při stanovení:

Pro laboratorní úlohu bude použit jako zkušební materiál vysušený písek frakce 0 – 4 mm. Z tohoto materiálu bude do kádinek o objemu 1 l odebráno celkem 6 vzorků. Do každého vzorku bude vneseno různé množství vlhkosti, a to následovně:

1. Vzorek č. 1 – suchý (bez dodatečné vlhkosti),
2. Vzorek č. 2 – 3 %,
3. Vzorek č. 3 – 5 %,
4. Vzorek č. 4 – 10 %,
5. Vzorek č. 5 – 15 %,
6. Vzorek č. 6 – 20 %.

V úvodu proběhne příprava vlhkých vzorků. Na základě zvolené hmotnosti suchého vzorku (hmotnost je rovna 1000 g, pokud není vedoucím cvičení stanoveno jinak) budou dopočítány potřebné přídavky vody. Voda potřebná k přípravě jednotlivých zkušebních vzorků bude postupně navážena v kádince 200 ml pomocí laboratorních vah. Následně bude aplikována na daný vzorek v kádince 1000 ml, vlhký vzorek bude pomocí laboratorní lžice zhomogenizován a následně bude nasypán do plastové nádoby, ve které bude pokračovat jeho homogenizace. Vzorek bude v plastové nádobě homogenizován střídavým otáčením dnem vzhůru, a to min. po dobu 3 minut.

Následně bude vzorek vsypán do skleněné kádinky a zhutněn setřásáním (10 opatrných úderů kádinkou o pracovní podložku z výšky max. 10 mm), aby bylo dosaženo optimální hutnosti vzorku. Následně bude do zkušebního vzorku umístěna vpichová sonda, a to tak, že bude vpich provedený kolmo dolů uprostřed vzorku a hrot sondy nebude blíže než 10 mm ode dna kádinky.

Následně bude na přístroji Testo 635 registrována teplota a relativní vlhkosti uvnitř vzorku. Hodnoty budou zapisovány v intervalu 20 s. Měření bude ukončeno ve chvíli, kdy se nebudou 3 po sobě jdoucí hodnoty naměřené relativní vlhkosti lišit o více jak 3 %. Výsledná teplota a relativní vlhkost budou zaznamenány.

Dále bude na daném vzorku provedeno stanovení materiálové vlhkosti gravimetricky pomocí sušících vah. Na váze bude spuštěn automatický měřicí program. Dále bude provedeno odklopení horního víka váhy, vložení vzorku písku na kovovou zkušební misku (doporučená navážka je 3 – 5 g). Měření započne dovržením horního víka váhy. Celý měřicí proces probíhá automaticky. Po vysušení vzorku se výsledná vlhkost zobrazí na displeji váhy. Výsledná hodnota se zaznamená. Po ukončení vážení se znovu otevře horní víko váhy a vysušený vzorek se z kovové misky odstraní.

Tento postup se zopakuje u všech šesti zkušebních vzorků.

Vyhodnocení:

Při vyhodnocení je nutné sestavit závislost naměřených hodnot materiálových vlhkostí (naměřených pomocí sušících vah) na relativní vlhkosti stanovené pomocí vpichové sondy a přístroje Testo 635. Výsledkem je potom kalibrační křivka (rovnice přímky nebo polynomu druhého stupně), která se proloží naměřenými body.

Tato křivka platí pro danou teplotu, při které bylo měření provedeno. Součástí vyhodnocení bude graf s naměřenými hodnotami a kalibrační křivkou.

Literatura

- [1] ŠTĀSTNÍK, S. a kol., Studijní opora k předmětu BJ-06 Fyzika stavebních látek, VUT Brno, 2006
- [2] ČERNÝ, R. a kol., Complex systém of methods for directed design and assesment of functional properties of building materials. ČVUT v Praze, Praha, 2010, 215 p., ISBN 978-80-01-04576-3
- [3] ČSN EN ISO 12572 - Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení prostupu vodní páry, Český normalizační institut, 2002
- [4] ČSN EN ISO 12570 - Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě, 2001
- [5] ČSN EN 993-14 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 14: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (křížové uspořádání),
- [6] ČSN 72 7012 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku,
- [7] ČSN EN 823 Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení tloušťky
- [8] ČSN EN 12085 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – stanovení lineárních rozměrů zkušebních vzorků,
- [9] ČSN EN 1602 Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti,
- [10] ČSN 730540 - Tepelná ochrana budov, Český normalizační institut, Praha
- [11] ISO 8301 Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus.