Tepelný odpor vzduchové mezery ve skutečnosti a podle normy ČSN EN ISO 6946

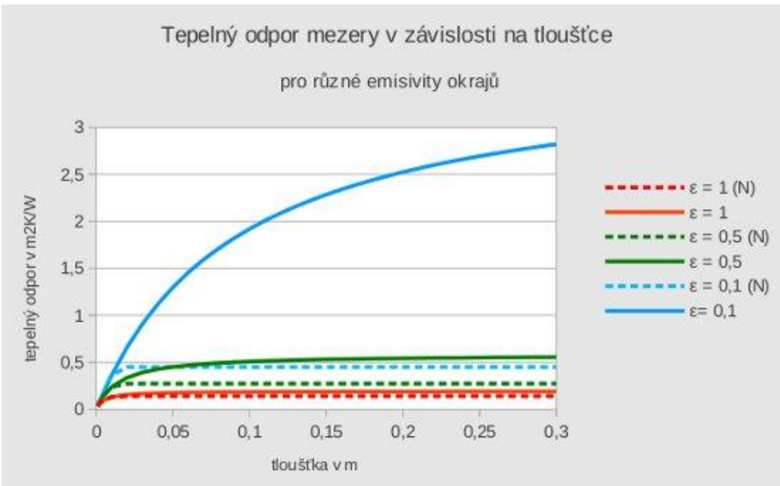
V současnosti probíhá trochu jednostranná odborná diskuse o účinnosti reflexních fólií, které bývají navrhovány do stavebních mezer. Diskutéři, kteří se odkazují na normu, tvrdí, že aplikovat reflexní fólie do mezer nemá smysl. Článek ukazuje, že norma uvádí chybný vzorec výpočtu. V důsledku toho celá tato diskuse i norma mj. poškozuje výrobce reflexních fólií i realizace z těchto materiálů.

Např. na vládním portálu **mpo-efekt.cz** byl dotaz, má-li smysl při zateplení podkroví uvažovat s parotěsnou reflexní folií a mezerou 4 cm, nebo raději mezeru vyplnit izolací. A odpověď byla hned po ruce na jednom soukromém webu. V článku *Více tepelné izolace nebo reflexní folie* od autora K.S. se tu dokazovalo pomocí ČSN EN ISO 6946, že je lépe celou mezeru vyplnit vatou.

Je třeba říct, že norma není certifikát na pravdu, dokazování pomocí normových vzorců je obecně závadné. Normový vzorec může být jen pouhý názor, který příroda buď poslouchá, nebo ne. Pokrok by se zastavil, kdybychom brali normy moc vážně. V případě normy ČSN EN ISO 6946 je navíc důvodné podezření, že jeho výpočtové vzorce popisují něco jiného, než skutečné chování přírody. Vyplývá to z vnitřní rozpornosti normy i z výsledků redakčního měření. ČSN EN ISO 6946, krátce řečeno, přebíjí jinak velmi silný podíl šíření tepla sáláním **uměle nadhodnoceným prouděním**. To má dva důsledky:

a) **Norma snižuje tepelný odpor vzduchové mezery až na zanedbatelnou hodnotu**. Příkladem může být příspěvek předokenní rolety k tepelnému odporu okenního zasklení na zanedbatelné úrovni 0,08 m²K/W.

b) **Vylučuje účinek reflexních fólií ve vzduchových mezerách**. Např. v mezerách tloušťky 40 mm a větších nemůže být tepelný odpor nikdy větší než 0,513 m²W/K, i kdyby emisivita ohraničujících fólií konvergovala k úplné nule.



Obr. 1: Při vyšších emisivitách hranic uzavřené mezery (nad hodnotou cca 0,5 a výš), je její tepelný odpor, počítaný podle normy ČSN EN ISO 6946, takřka stejný, jako odpor počítaný podle vztahů (1') a (3'), které nezahrnují proudění tepla. Při nízkých emisivitách (cca 0,1) je rozdíl mezi oběma modely naopak velmi nápadný (viz modré křivky).

Normové "vlastnosti" vzduchové mezery tloušťky 4 cm

V citovaném příspěvku K.S. (dále jen autor) o vzduchové mezeře tloušťky 40 mm píše: "*Zaměřme se na vliv reflexních parozábran, jelikož se lze setkat s celou řadou informací, které jsou často rozporuplné a v řadě případů i mylně vykládané. Například již zmiňovaný vliv reflexe. ... Reflexní povrchy mají vysokou reflexi (definuje, kolik procent záření se odrazí) a malou emisivitu (definuje, kolik procent se vyzáří, úplná minima se pohybují na hranici 0,017 což je 1,7 %). Reflexní materiály svojí reflexní vrstvou dokáží významně odrážet teplo, a tím snižují součinitel tepelné vodivosti vzduchové mezery sousedící s reflexní vrstvou v souladu s ČSN EN ISO 6946.*"

Autor k rozporům a omylům sám dál přispěl. Reflexní a nízkoemisivní povrchy nejenže teplo významně odrážejí, ony ho také nevyzařují, viz příklad ještěrky na obr. 2. Autor zejména neřekl, k jakému základu se emisivita (sálavost, zářivost) vztahuje. Upřesněme tedy, že reflexní povrch s emisivitou 1,7 % sálá s hustotou výkonu (intenzitou) **0,017×418,7 W/m² = 7,12 W/m²**. 418,7 W/m² je intenzita sálání černého tělesa při teplotě 20 °C. Volba právě této teploty je v normě ČSN EN ISO 6946 klíčová, jak dál ukážeme. Běžný reflexní povrch má emisivitu ovšem mnohem vyšší, běžně kolem hodnoty 0,1, a sálá tudíž (při teplotě 20 °C) s intenzitou 41,87 W/m². Tato čísla ilustrují, v jakých dimenzích se dějí zářivé toky tepla v mezerách.

Autor pak podle normy počítá příklad, kdy je použita parozábrana bez reflexe a celá mezera je vyplněna minerální tepelnou izolací. Vychází mu tepelný odpor R_2 = 1,000 m²·K·W^{-1}. A pak se pouští do mezery s reflexí: "*Jako modelový příklad lze použít předešlou konstrukci s tím, že tepelnou izolaci pod parozábranou nahradíme uzavřenou vzduchovou mezerou a použijeme parozábranu reflexní. Skladbu konstrukce tedy známe a proto můžeme začít s výpočtem.*" Ten vychází z normového vzorce

$$R_g = \frac{1}{h_a + E\,h_{r20}} = \frac{1}{h_a + \dfrac{h_{r20}}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}} \qquad (1)$$

kde

R_g je tepelný odpor vzduchové mezery v m²K/W,
h_a = 1,95 W/(m²K) je součinitel přestupu tepla při vedení a proudění v mezeře 4 cm,
h_{r20} = 5,71 W/(m²K) je součinitel přestupu tepla při sálání mezi černými, rovnoběžnými plochami, ε_1 a ε_2 jsou bezrozměrné poměrné emisivity povrchů, které ohraničují mezeru a E = $1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$ je poměrný součinitel vzájemného sálání obou ploch.

Z didaktických důvodů je vhodné se u tohoto vzorce zastavit. Součinitel h_{r20} = 5,7 W/(m²K) vyplývá z velmi důležité aplikace Stefanova - Boltzmannova zákona z roku 1879 o sálání těles. Ta popisuje sdílení sálavého tepla mezi dvěma rovnoběžnými, nekonečnými deskami, které jsou dokonale černé (sálavé):

$$I_s = \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (2)$$

kde T_2 = 273,15 + t_1 a T_2 = 273,15 +t_2 jsou termodynamické teploty desek v K a t_2 a t_1 jsou teploty ve °C. Číslo σ = 5,67×10^{-8} W/(m²K^4) je Stefanova - Boltzmannova konstanta. Při nekonečně malém teplotním rozdílu desek kolem teploty t = 20 °C lze součinitel h_{r20} zapsat jako:

$$h_{r20} = \lim_{t=20^\circ C} \sigma \frac{(273{,}15+t)^4 - (293{,}15)^4}{t-20} = 4 \cdot \sigma \cdot 293{,}15^3 \quad (3)$$

Ekvivalentně lze číslo h_{r20} = 5,71 W/(m²K) určit jako první (lineální) člen Taylorova rozvoje funkce $\sigma T^4 = \sigma(273{,}15 + t)^4$, rozvinutého kolem teploty t = 20 °C. Výsledkem je tatáž hodnota h_{r20} = 4·σ·293,153 = 5,71 W/(m²K). Smyslem toho snažení je vyjádřit intenzitu sálání černé plochy lineárním vztahem

$$I_s = \sigma T^4 = 4\,\sigma\,293{,}15^3 (t-20) = h_{r20}(t-20) \quad (4)$$

a intenzitu sdílení sálavého tepla mezi dvěma sálavými deskami jako:

$$I_s = \sigma(T_2^4 - T_1^4) = h_{r20}\left|(t_2-20)-(t_1-20)\right| = h_{r20}(t_2-t_1) \quad (5)$$

Lineární vztahy popisující sálání tepla lze tak formálně zapracovat do teplotně lineárních rovnic, které popisují vedení tepla a které jsou základem stavebních tepelných výpočtů. Součinitel h_r závisí na teplotě podle tab. 1. Správný návrh by měl tuto skutečnost zohlednit a zvolit tento součinitel tak, aby zhruba odpovídal střední teplotě mezi deskami.

Teplota; °C	−20	0	20	40
h_r; W/(m²K)	3.7	4.6	5.7	7,0

Tab. 1: Součinitel přestupu tepla $\boldsymbol{h_r}$ mezi černými plochami při různých teplotách.

V případě šedých a nízkoemisivních ploch, u nichž $\varepsilon_1 < 1$ a/nebo $\varepsilon_2 < 1$ se použije místo čísla h_{r20} součin $E \cdot h_r$, kde $E = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$ je poměrný součinitel vzájemného sálání obou ploch. Postupme dál:

Rozpory normy ČSN EN ISO 6946

Jeden je při pozorném rozboru rovnice (1) zcela nápadný. Rovnice vůbec neuvažuje teplotní závislost sdílení tepla při sálání, která **očividně vyplývá ze (2)**. Konstrukce normy sice obsahuje při teplotním rozdílu ΔT > 5 K mezi okraji teplotní závislost, vyjádřenou funkcí 1,14×(ΔT)$^{1/3}$ W/(m^{2}K). Ale na první pohled jde jen o velmi umělé navázání konstanty 1,95 W/(m^{2}K) na tuto funkci bez sebemenšího fyzikálního odůvodnění. Mimořádně hloupé je, že od rozdílu teplot ΔT > 5 K klesá jen součinitel h_a nesálavé složky (jen Bůh ví, jak na to normotvůrce přišel), ale sálavý člen h_r zůstává konstantní, přestože jeho učebnicovou teplotní závislost lze jednoduše a hlavně velmi přesně spočítat!

Druhý problém se týká tloušťkové závislosti šíření tepla v mezeře. Uvažujme mezeru 4 cm ohraničenou běžnými, tzn. vysoce sálavými povrchy s $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$. Její tepelný odpor, podle (1), je R_g = 0,13 m²K/W při 20 °C. To je stejná hodnota, jakou má přestup tepla z povrchu stěny do pobytového prostoru. Což znamená, že protilehlá deska tvoří prostorové pozadí. Můžeme ji jakkoli vzdálit a tepelný odpor mezery stejný, tj. 0,13 m²K/W. Příroda ale takto nepracuje, jak ještě ukážeme.

Teorie **sálaní** těles jasně říká, že **sálavý člen** h_r nezávisí na tloušťce mezery. Potom by se, v logice normy, neměl měnit s tloušťkou ani nesálavý člen h_a. To by pak znamenalo, že nesálavý součinitel tepelné vodivosti, který je dominantně tvořen prouděním vzduchu, musí **přesně lineárně růst s tloušťkou!** A musí **přesně kompenzovat tloušťkový růst difúzního tepelného odporu při vedení tepla**.

Jak má ale vítr v mezeře vědět, co má dělat? A proč by to tak vždy dělal i pro různě tlusté mezery?

Představme si nyní mezeru tl. 12 cm, opět se sálavými okraji. Vložme doprostřed sálavou přepážku, takže vznikne vrstva ze dvou mezer. Obě budou mít stejný tepelný odpor 0,13 m²K/W, a to i tehdy, umístíme-li přepážku nesymetricky, např. ve vzdálenosti 4 cm od od jednoho z okrajů.

Zároveň bude teplota přepážky, umístěné ve středu i mimo střed, přesným aritmetickým průměrem mezi okrajovými teplotami. Přesně to plyne **jen z teorie sálání tepla**. V žádném případě se takto nedá popsat proudění vzduchu v mezerách.

Měření na Λ-válci

Λ-válec je zařízení určené k měření tepelného odporu tenkých, řádově několikamilimetrových ohebných vzorků ve tvaru pásů. Popsán je např. v [1], [2] a [3].

Princip je jednoduchý. Tepelný tok prostupuje pláštěm PVC trubice, vzorkem a přes povrchový přestupový odpor do ustáleného prostředí laboratoře. Zpracování výsledků měření zohledňuje, že každý následující návin má z důvodů větší plochy menší, ale spočítatelný celkový tepelný odpor v K/W. Aparatura má v zásadě tři neznámé konstanty – tepelnou ztrátu unikající mimo měřený vzorek, přestupový tepelný odpor na povrchu navinutého vzorku v K/W a součinitel tepelné vodivosti vzorku. Ze tří měření jednoho, dvojitého a trojitého návinu neznámého vzorku lze všechny tři určit. Z velkého počtu měření různých známých a neznámých vzorků lze okalibrovat zařízení (stanovit s dostatečnou přesností přístrojovou tep. ztrátu a typické povrchové přestupové odpory).

Výsledky měření vzduchové mezery tl. 4 cm

Vzduchová mezera se sálavými okraji byla na Λ-válci vytvořena tak, že na tři tenké obroučky z polypropylénové pěny šířky 4 cm na okrajích a uprostřed válce byl navinut tuhý balicí papír. Emisivity povrchu válce i papíru byly shodně zvoleny $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \approx 0{,}9$. To odpovídá součiniteli vzájemného sálání $E \approx 0,82$. Dodejme, že tabulkové emisivity pro PVC a papír jsou vyšší, kolem $\varepsilon \approx 0,92$. Ukažme si naměřené hodnoty:

Veličina	Jednotka	hodnota
Celkový ustálený tok tepla	W	23,21
Ustálený tok tepla vzorkem	W	20,74
Povrchová teplota 1 v mezeře	°C	22,0
Povrchová teplota 2 v mezeře	°C	18,1
Sdílení tepla sáláním	W	20,34
Nesálavé sdílení tepla	W	0,40

Tab. 2: Ustálené tepelné veličiny na vzduchové mezeře tl. 4 cm sestavené na Λ-válci. Sdílení tepla sáláním je stanoveno podle [4] jako sdílení sálání mezi dvěma soustřednými válci (jeden uvnitř druhého).

Předposlední řádek modrým písmem – sdílení tepla sáláním mezi soustřednými válcovými stěnami – vyjadřuje nikoliv údaj z měření, ale hodnotu stanovenou přímo ze Stefanova Boltzmannova zákona. Sdílení sálavého tepla mezi dvěma dobře definovanými tělesy, jako je tento případ "trubky v trubce", lze podle tohoto zákona stanovit velmi přesně.

Červeně na posledním řádku je vyčísleno nesálavé sdílení tepla mezi soustřednými válcovými stěnami, a sice jako rozdíl mezi ustáleným tokem tepla (v řádku 3) a spočítanou hodnotou sálavého sdílení tepla (v ř. 6).

Na první pohled je zřejmý mizivý vliv vedení a proudění tepla v mezeře ve srovnání se sáláním. **Norma předpokládá, že je podíl vedení a proudění minimálně 26 procent**. Měření ale ukazuje, že tento podíl je sotva několik procent.

Při započtení zhruba 5 % chyby při odečítání teplot a přibližně stejné chyby při odhadu emisivity obou povrchů se můžeme dostat až na hodnotu **cca 14 % podílu nesálavé složky šíření tepla v mezeře**. Tomu odpovídá součinitel přestupu tepla při vedení a proudění **0,66 W/(m²K)** a efektivní "nesálavá" lambda mezery tl. 4 cm o velikosti **0,026 W/(mK)**.

Obr. 2: Jak chameleon pracuje se slunečním tepelným zářením: Samička chameleona namibijského hledá v poušti partnera... Brzy ráno se ale potřebuje zahřát, a proto využívá univerzální schopnosti kůže chameleonů - strana obrácená k slunci je tmavá, aby zachycovala

co nejvíc tepla, zatímco druhá zůstává světlá, aby minimalizovala tepelné ztráty (z cyklu Život od BBC na ČT 2).

Komentář

Norma vypovídá o slabém porozumění významu sálání ve stavební technické praxi.

Ve skutečnosti platí, že **sálavý** "odpor" mezery nezávisí na tloušťce mezery, jen teplotách ohraničujících povrchů stěny, které lze **jen** v 1. přiblížení nahradit jejich průměrem. Naopak nesálavý tepelný odpor R_a však **vždy** vykazuje závislost na tloušťce *d*. Při malých tloušťkách mezery roste lineárně podle vztahu $R_a = 1/h_a = d/\lambda$, kdy nesálavý součinitel tepelné vodivosti λ je tloušťkově konstantní a roven součiniteli tepelné vodivosti vzduchu (λ = 0,025 W(mK) při 10 °C). Při větších tloušťkách tento součinitel mírně roste vlivem proudění.

Použitím pravidla o sčítání paralelních odporů vypočítáme celkový odpor mezery R_g jako

$$R_g = \frac{1}{\frac{\lambda}{d} + E \cdot h_r} \qquad (1')$$

kde

$$h_r = \sigma \frac{\Delta T^4}{\Delta T} \approx 4\,\sigma\, T_m^3 \qquad (3')$$

a kde T_m je teplotní střed mezi okrajovými teplotami v K.

Spojitá a hladká tloušťková a teplotní závislost nesálavého i sálavého členu v (1'), kterou norma a vzorec (1) řeší nefyzikálně, nepřesně a v ostatních případech proti přírodě, je zásadní.

Při větších tloušťkách mezery od několika mm výše (pro sálavé povrchy mezery), nebo od několika cm až dm výše (pro reflexní povrchy), začíná však vždy převládat sálavá složka nad vedením a prouděním. Tepelný odpor pro rostoucí tloušťky tak přechází v konstantu $R_g \rightarrow 1/(E \cdot h_r)$.

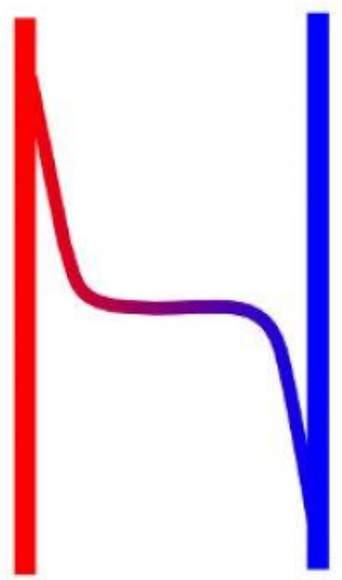
Když normotvůrce zjistil, že od nějaké tloušťky přestává růst tepelný odpor mezery, chvíli se podivoval. Protože v mezeře neviděl, nevyčichal ani nenahmatal tepelné záření, usoudil, že se v mezeře musejí prohánět větry, které přenášejí právě tolik tepla, že tepelný odpor neroste. A přesvědčil o tom všechny kolem sebe.

Vymizení tloušťkové závislosti tepelného odporu má ovšem na svědomí sálání, které – od nějaké tloušťky – vždy začíná převažovat. Záření, tedy fotonový plyn (od začátku 20. století exaktní fyzikální pojem), je v mezeře intenzivně (rychlostí světla) promícháván a udržován tak na střední teplotě mezi okrajovými teplotami povrchů mezery. To naznačuje další možné efekty:

Fotonový plyn v jakékoliv mezeře má tendenci ohřívat vzduch právě na onu zmíněnou střední teplotu.
V tenkých mezerách a v těsné blízkosti stěn mezery je vliv tohoto efektu malý: převažuje tu "srážkové" předávání tepla od stěn na molekuly a mezi molekulami, které vykonávají Brownům pohyb.

V silných nevětraných mezerách a ve větší vzdálenosti od okrajů mezery může být ohřev vzduchu fotonovým plynem významný. To by znamenalo, že v nějaké středové vrstvě vzduchu dojde ke snížení teplotního gradientu, nebo až vyrovnání teplot. A tím ke zpomalení až zastaveni vedení i proudění tepla.

Což možná vysvětluje i překvapivý výsledek popsaného měření vzduchové mezery na Λ-válci (viz tab. 2), v němž sálavá složka, i přes velmi nízké emisivity hranic mezery, zaujímala podíl přes 98,1 %, zatímco zbytek 1,9 % připadl na vedení a proudění, což odpovídá součiniteli (nesálavé) tepelné vodivosti $\lambda = 0,003$ W/(mK).



Obr. 3: Zatímco v tenké mezeře se vždy ustálí lineární teplotní gradient, v silné mezeře může fotonový plyn ohřát vnitřní vzduchové vrstvy stejnoměrně cca na úroveň středové teploty.

Závěr

Je třeba říct, že na základě jedné série měření nelze hned přepsat normový vzorec (1). Fyzikální omyly v konstrukci vzorce (1) i výsledky měření ale bohatě stačí na to, aby byla norma ČSN EN ISO 6946 přezkoumána a zrevidována. Revize musí napravit i absurdní výstup, že předstěna se sálavými vnitřními povrchy, která vymezuje vzduchovou mezeru, má tepelnou izolaci nezávislou na tloušťce a jen o málo vyšší, než odpovídá přestupovému odporu nechráněné zdi, která sálá rovnou do prostoru...

Norma by také neměla stavět mimo hru výrobky a technologie z oblasti stínicích předmětů, jako jsou rolety, žaluzie ap., a z příbuzné oblasti stavební reflexní techniky na základě jiných pravidel, než které nám nastavila sama příroda.