

Nejnižší vnitřní povrchová teplota a teplotní faktor

Zbyněk Svoboda, FSv ČVUT

Původní text ze skript „Stavební fyzika 31“ z roku 2004. Částečně aktualizováno v roce 2014 především s ohledem na změny v normách.

Nejnižší vnitřní povrchová teplota a teplotní faktor vnitřního povrchu se používají při hodnocení rizika kondenzace vodní páry a výskytu plísní na vnitřním povrchu stavební konstrukce.

1.1. Požadavky

Pro hodnocení požadavků na vnitřní povrchovou teplotu používá norma ČSN 730540-2 **teplotní faktor vnitřního povrchu**. Jedná se o poměrnou veličinu, která je na rozdíl od vnitřní povrchové teploty vlastností konstrukce a nezávisí na působících teplotách.

Požadavky na teplotní faktor jsou stanoveny odlišně pro neprůsvitné konstrukce a pro výplně otvorů (okna, dveře). Pro neprůsvitné konstrukce je kritériem vyloučení vzniku plísní, pro okna je kritériem vyloučení povrchové kondenzace vodní páry.

Za hranici **vyloučení vzniku plísní** je pokládána relativní vlhkost vnitřního povrchu **80 %**. Pokud je povrchová relativní vlhkost nižší, vznik plísní je prakticky vyloučen. Při vyšší relativní vlhkosti je naopak riziko velmi značné. Kritická povrchová relativní vlhkost pro **vyloučení povrchové kondenzace** je **100 %** - při nižších vlhkostech ke kondenzaci vodní páry na povrchu konstrukce nedochází.

Konkrétní požadavky stanovuje ČSN 730540-2 v čl. 5.1. Konstrukce v běžných prostorech s relativní vlhkostí vnitřního vzduchu **do maximálně 60 %** musí ve všech místech svého vnitřního povrchu splňovat podmínku

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,N} = f_{Rsi,cr}, \quad [-] \quad (1)$$

kde f_{Rsi} je vypočtený nejnižší teplotní faktor vnitřního povrchu konstrukce a $f_{Rsi,cr}$ je kritický teplotní faktor vnitřního povrchu.

Kritický teplotní faktor $f_{Rsi,cr}$ je hodnotou, při které bude relativní vlhkost na vnitřním povrchu konstrukce dosahovat předepsaného maxima. Stanovuje se s pomocí vztahu

$$f_{Rsi,cr} = 1 - \frac{237,3 + 21 \cdot \theta_{ai}}{\theta_{ai} - \theta_{ex}} \cdot \frac{1}{11 - 17,269 / \ln(\varphi_{i,r} / \varphi_{si,cr})}, \quad [-] \quad (2)$$

kde θ_{ai} je návrhová teplota vnitřního vzduchu ve °C, θ_{ex} je návrhová teplota prostředí na vnější straně hodnocené konstrukce ve °C (obvykle jde o návrhovou venkovní teplotu), $\varphi_{si,cr}$ je kritická vnitřní povrchová vlhkost v % (pro výplně otvorů se uvažuje 100 %, pro ostatní konstrukce 80 %), a $\varphi_{i,r}$ je relativní vlhkost vnitřního vzduchu pro stanovení požadavku v %, která se určí:

a) pro prostory, v nichž je upravována vlhkost vzduchu vzduchotechnikou, ze vztahu

$$\varphi_{i,r} = \varphi_i + 5, \quad [\%] \quad (3)$$

kde φ_i je návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu v zimním období zajišťovaná vzduchotechnikou v % (pro místnosti s dlouhodobým pobytem osob v běžných budovách se uvažuje $\varphi_i \geq 40 \%$).

b) pro ostatní prostory ze vztahu

$$\varphi_{i,r} = \varphi_i + \theta_e + 10, \quad [\%] \quad (4)$$

přičemž pro stavební konstrukce s výjimkou výplní otvorů nesmí hodnota $\varphi_{i,r}$ klesnout pod úroveň

$$\varphi_{i,r} = \varphi_i - 5, \quad [\%] \quad (5)$$

kde φ_i je návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu v zimním období v % (standardně se uvažuje $\varphi_i = 50$ %) a θ_e je návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období ve °C.

Vztah (4) vyjadřuje závislost relativní vlhkosti vnitřního vzduchu na teplotě a vlhkosti venkovního vzduchu v zimním období¹. Předpokládá se pokles relativní vlhkosti vnitřního vzduchu o 1 % na každý 1 °C poklesu návrhové teploty venkovního vzduchu pod hraniční hodnotu -5 °C.

Pro základní případy návrhové teploty vnitřního vzduchu a vnitřní relativní vlhkosti lze hodnoty $f_{Rsi,cr}$ najít přímo tabelované v ČSN 730540-2.

Pokud je relativní vlhkost vnitřního vzduchu **vyšší než 60 %**, připouští ČSN 730540-2 nesplnění požadavku (1) – ovšem s tím, že musí být:

- pro výplně otvorů splnění požadavek na součinitel prostupu tepla a současně musí být zajištěna bezchybná funkce konstrukce při povrchové kondenzaci a vyloučeno nepříznivé působení kondenzátu na navazující konstrukce
- pro ostatní konstrukce zajištěno vyloučení růstu plísní jiným způsobem než splněním požadavku (1) – účinnost tohoto opatření musí být doložena. Zároveň musí být buď vyloučeno riziko vzniku povrchové kondenzace nebo musí být zajištěna bezchybná funkce konstrukce při povrchové kondenzaci a vyloučeno nepříznivé působení kondenzátu na navazující konstrukce.

Ve vlhkých provozech je přípustné splnit požadavek ČSN 730540-2 na teplotní faktor i tím, že se u hodnocené konstrukce sníží potřebným způsobem relativní vlhkost vnitřního vzduchu (obvykle s pomocí vzduchotechniky)².

Posledním normovým požadavkem týkajícím se rizika vzniku povrchové kondenzace je požadavek na **vnitřní povrchovou teplotu vnějšího pláště dvouplášťových konstrukcí**. Norma požaduje v čl. 5.1.6, aby vypočtený teplotní faktor vnitřního povrchu vnějšího pláště splňoval podmínku (1), přičemž požadovaná hodnota kritického teplotního faktoru vnitřního povrchu $f_{Rsi,cr}$ se stanoví ze vztahu (2). Návrhové parametry vnitřního vzduchu ve vztahu (2) – tj. hodnoty θ_{ai} a $\varphi_{i,r}$ – se přitom uvažují rovné teplotě, resp. relativní vlhkosti vzduchu ve větrané vzduchové vrstvě (bez dalších přepočtů a úprav) a kritická relativní vlhkost se uvažuje $\varphi_{si,cr} = 90$ %. Obvykle postačuje posoudit splnění tohoto požadavku jen na konci větrané vzduchové vrstvy.

1.2. Postup výpočtu

1.2.1. Rovinné konstrukce

Nejnižší **teplotní faktor** vnitřního povrchu konstrukce se stanoví z obecného vztahu

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_{ai} - \theta_e}, \quad [-] \quad (6)$$

kde θ_{ai} je teplota na vnitřní straně hodnocené konstrukce ve °C (obvykle návrhová teplota vnitřního vzduchu), θ_e je teplota na vnější straně hodnocené konstrukce ve °C (obvykle návrhová venkovní teplota) a θ_{si} je nejnižší vnitřní povrchová teplota ve °C. Z konstrukce vztahu (6) je zřejmé, že na konkrétních hodnotách teplot v zásadě nezáleží – hodnota teplotního faktoru vyjde shodně pro prakticky libovolnou kombinaci vnitřní a vnější teploty. Podmínkou je ovšem to, aby byla venkovní

¹ Vztah (4) byl oproti zápisu v ČSN 730540-2 zjednodušen – stejně jako vztahy (3) a (5). Z normového zápisu je zřejmější, jak je zajištěna rozměrová kompatibilita v uvedených vztazích.

² Typickým příkladem je ofukování prosklených konstrukcí bazénových hal teplým suchým vzduchem.

teplota nižší než teplota vnitřní – a aby byl navíc zachován výraznější rozdíl mezi oběma teplotami³.

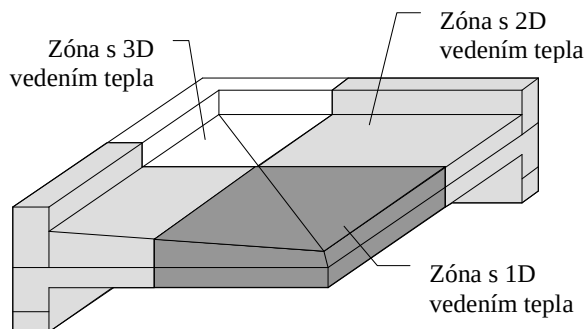
Potřebnou nejnižší vnitřní povrchovou teplotu rovinné konstrukce s jednorozměrným šířením tepla (Obr. 1) lze stanovit ze vztahu

$$\theta_{si} = \theta_{ai} - U \cdot R_{si} \cdot (\theta_{ai} - \theta_e), \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

kde θ_{ai} je návrhová teplota vnitřního vzduchu ve $^{\circ}\text{C}$, θ_e je návrhová teplota na vnější straně konstrukce ve $^{\circ}\text{C}$ (obvykle jde o návrhovou venkovní teplotu), U je součinitel prostupu tepla konstrukce ve $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a R_{si} je tepelný odpor při přestupu na vnitřní straně v $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Odpor při přestupu tepla R_{si} se podle ČSN 730540-2 a ČSN EN ISO 13788 uvažuje hodnotou **0,25 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$** pro neprůsvitné konstrukce a hodnotou **0,13 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$** pro výplně otvorů.

1.2.2. Tepelné mosty a vazby

Teplotní faktor lze stanovit podle vztahu (6) nejen pro plošné konstrukce, ale samozřejmě i pro libovolné styky stavebních konstrukcí (tepelné vazby) či pro místa v plošných konstrukcích poblíž systematických tepelných mostů. Problémem je ovšem určení nejnižší vnitřní povrchové teploty v těchto místech. Jednoduchý vztah (7) již totiž bohužel nelze pro tepelné mosty a vazby s vícerozměrným šířením tepla (Obr. 1) použít.

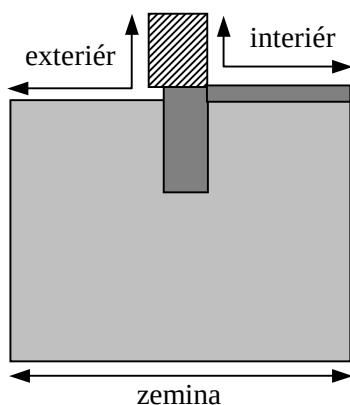


Obr. 1 Zóny s různými typy vedení tepla

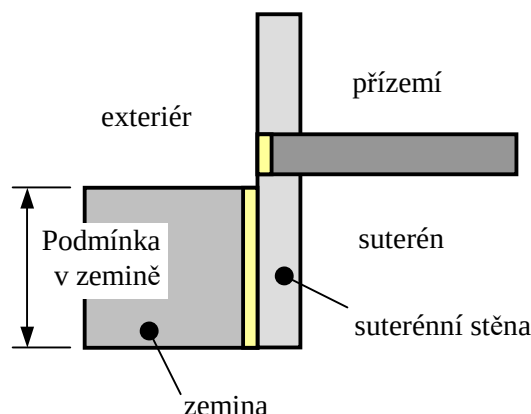
V těchto případech je nezbytné stanovit nejnižší vnitřní povrchovou teplotu numerickým řešením parciální diferenciální rovnice vedení tepla⁴. Tradičně se pro tyto účely používá metoda sítí, nověji pak metoda konečných prvků. Provést výpočet teplotního pole ručně je prakticky vyloučeno – dnes se pro tyto účely používají **specializované programy**. Na základě výsledků výpočtu lze pak následně určit nejnižší vnitřní povrchovou teplotu. Vzhledem k rozsahu skript není bohužel možné dále podrobně probírat pravidla pro modelování detailů či popisovat použití konkrétního programu (tyto informace lze nalézt v rozličné a rozsáhlé literatuře). Podívejme se ale podrobněji alespoň na jednu velmi důležitou součást hodnocení tepelných mostů – na **zadávání okrajových podmínek**.

³ V opačném případě nemusí být teplotní faktor dobře definován (vyjde buď záporná či naopak příliš vysoká kladná hodnota) nebo nemusí jít vůbec vypočítat (při shodě teplot).

⁴ Pro určité typy tepelných mostů a vazeb (např. pro kouty a pro pásové tepelné mosty) byly vytvořeny přibližné metody výpočtu nejnižší vnitřní povrchové teploty. Jedná se o vztahy odvozené z přesného numerického řešení, které pracují s přesností zhruba $\pm 20\%$. Některé z těchto postupů uvádí ČSN 730540-4.



Obr. 2 Umístění okrajových podmínek



Obr. 3 Svislá okrajová podmínka v zemině

Ve výpočtech se používá návrhová teplota vnitřního vzduchu, návrhová venkovní teplota a teplota v zemině (viz část **Okrajové podmínky**). Součinitele přestupu tepla se uvažují podle Tab. 2 v části **Součinitel prostupu tepla** – v tomto případě musí být samozřejmě použity hodnoty pro výpočet povrchových teplot. Okrajové podmínky se standardně zadávají pro ty hranice detailu, které jsou v kontaktu s vnitřním vzduchem, vnějším vzduchem a se zeminou⁵ (Obr. 2). Zásadně se nezadávají na rozhraních mezi řešeným detailem a okolní konstrukcí. Výjimkou je jen hodnocení suterénních stěn, kdy je nutné okrajovou podmínku v zemině zadat ve směru svislém (Obr. 3). Tuto podmínku je dále třeba rozdělit na několik dílčích částí – po zhruba 1 m – a teploty v zemině zadávat podle Tab. 1 v části **Okrajové podmínky**.

Nejnižší vnitřní povrchovou teplotu lze po výpočtu teplotního pole nalézt jako minimum z teplot v těch uzlových bodech sítě, které leží na vnitřním povrchu detailu. Některé z aplikačních programů tento výběr provádějí dokonce i samy. Často je možné hledat nejnižší vnitřní povrchovou teplotu i s pomocí grafického výstupu.

1.3. Příklady

1.3.1. Rovinná konstrukce

Prvním příkladem je stěnová jednovrstvá zděná konstrukce tl. 400 mm o součiniteli prostupu tepla $U = 0,4 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Konstrukce je umístěna v prostředí o návrhové teplotě vnitřního vzduchu 25°C a relativní vlhkosti 75 %. Vlhkost je udržována vzduchotechnikou. Návrhová venkovní teplota je -15°C . Vytápění je nepřerušované.

Nejprve je třeba stanovit **požadavek** na minimální teplotní faktor. Kritický teplotní faktor vychází ze vztahu (2) jako $f_{Rsi,cr} = 0,944$, takže požadavek ČSN 730540-2 činí $f_{Rsi,N} = 0,944$.

Výpočtem ze vztahu (7) dostáváme $\theta_{si} = 25 - 0,4 \cdot 0,25 \cdot (25 + 15) = 21,0^\circ\text{C}$ a ze vztahu (6) pak $f_{Rsi} = (21,0 + 15) / (25 + 15) = 0,900$. Vypočtená hodnota je nižší než $f_{Rsi,N}$ – konstrukce tedy nesplňuje požadavek ČSN 730540-2 na vnitřní povrchovou teplotu (resp. teplotní faktor).

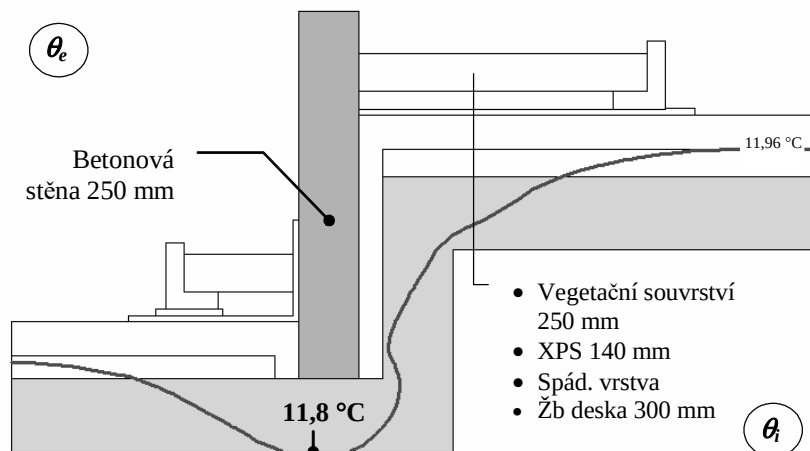
Vzhledem k tomu, že relativní vlhkost vnitřního vzduchu přesahuje 60 %, nicméně ČSN 730540-2 připouští nesplnění uvedeného požadavku. Musí být ovšem vyloučen nějakým trvale účinným způsobem růst plísní a musí být zajištěna funkce konstrukce při povrchové kondenzaci vodní páry.

1.3.2. Tepelná vazba

Druhým příkladem je detail styku dvou úrovní střešní konstrukce (Obr. 4). V místě styku je umístěna betonová stěna tl. 250 mm. Střecha má obrácenou skladbu s převážně pochůznou

⁵ Hloubka zeminy přilehlá k detailu se uvažuje podle Obr. 2 v části **Okrajové podmínky** (varianta pro výpočet povrchových teplot).

úpravou⁶. Pod ní jsou umístěny kanceláře s návrhovou teplotou vnitřního vzduchu 21 °C a relativní vlhkostí 50% (přirozeně větrané, bez klimatizace). Vytápění je tlumené s poklesem výsledné teploty do 5 °C. Návrhová venkovní teplota je -15 °C.



Obr. 4 Detail styku dvou úrovní střechy

Požadovaný minimální teplotní faktor vnitřního povrchu je $f_{Rsi,N} = 0,749$.

Výpočtem teplotního pole programem Area byla stanovena nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce ve výši 11,8 °C a nejnižší teplotní faktor vnitřního povrchu $f_{Rsi} = 0,744$. Průběh izotermy 11,96 °C (odpovídá požadovanému teplotnímu faktoru 0,749) v detailu ukazuje Obr. 4 – je zřejmé, že detail v části pod betonovou stěnou nesplní požadavek ČSN 730540-2 na vnitřní povrchovou teplotu.

Detail bylo nutné upravit. Vložením bloku pěnového skla 100 x 250 mm pod betonovou stěnu bylo docíleno zvýšení nejnižší vnitřní povrchové teploty na 16,2 °C a teplotního faktoru na 0,867 a detail pak požadavky splnil.

⁶ Dlažba na podložkách - tato vrstva se do hodnocení detailu ovšem nezadává.