

# Nové pravidlá výpočtu šírenia tepla v technických zariadeniach budov – časť 2

## New trends in calculation of heat transfer in technical equipment of buildings – Part 2

Doc. Ing. Jana PERÁČKOVÁ, Ph.D.,  
Slovenská technická univerzita,  
Stavebná fakulta Bratislava  
Katedra technických zariadení budov

### 2. STANOVENIE OKRAJOVÝCH PODMIENOK PRE VÝPOČET HRÚBKY IZOLÁCIE

Hrúbku tepelnej izolácie potrubia môžeme vypočítať, ak zvolíme jednu z hlavných okrajových podmienok:

- a) danú hustotu tepelného toku,
- b) stanovenú povrchovú teplotu.

Pre výpočet ďalej potrebujeme stanoviť tieto okrajové podmienky:

- teplota prúdiacej látky v potrubí,
- teplota okolitého vzduchu,
- priemer potrubia,
- súčiniteľ tepelnej vodivosti tepelnoizolačnej látky pri strednej teplote, (podľa vzťahu (1)),
- súčiniteľ prestupu tepla na vonkajšej strane (podľa vzťahov 20, 21).

#### 2.1 Určenie hrúbky tepelnoizolačnej vrstvy pri danej hustote tepelného toku

Izolácia potrubia by mala znížiť tepelné straty na najnižšiu možnú hodnotu. Pri výpočte hrúbky izolácie potrubia je vhodné voliť *maximálnu tepelnú stratu izolovaného potrubia v budovách do menovitej svetlosti DN 50 okolo 6 až 12 W.m<sup>-1</sup>, pre väčšie svetlosti okolo 12 až 20 W.m<sup>-1</sup>*, čo závisí hlavne na rozdiel teplot prostredia a látky v potrubí alebo zariadení. Pre lineárnu hustotu tepelného toku platia rovnice (6), (25) a (27). Pri podrobnom výpočte volíme počiatočnú hrúbku izolácie a vypočítame tepelnú stratu. Ak je tepelný tok stále väčší ako sme si stanovili, zväčšíme hrúbku izolácie.

Uvedený postup je pracný. Pre praktický návrh hrúbky izolácie môžeme použiť diagram 1. Pre jeho použitie potrebujeme vypočítať pomocnú veličinu, tzv. **parameter hrúbky C'** v m. Rovnica pre C' je odvodená z rovníc (25) a (27) jednoduchou úpravou.

Rovnica (29) umožňuje navrhnuť hrúbku izolácie pri danej lineárnej hustote tepelného toku:

$$C' = 2 \cdot \lambda \left( \frac{\Theta_m - \Theta_a}{q} - \frac{1}{h_{se}} \right) \quad [m] \quad (29)$$

Pre návrh hrúbky izolácie pri danej lineárnej hustote tepelného toku diagramom 1 slúži príklad a).

#### Príklad a):

daná je hustota tepelného toku q

$$\Theta_m = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Theta_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{se} = 5,7 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda = 0,068 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$D = 0,324 \text{ m}$$

$$q = 63 \text{ W.m}^{-2}$$

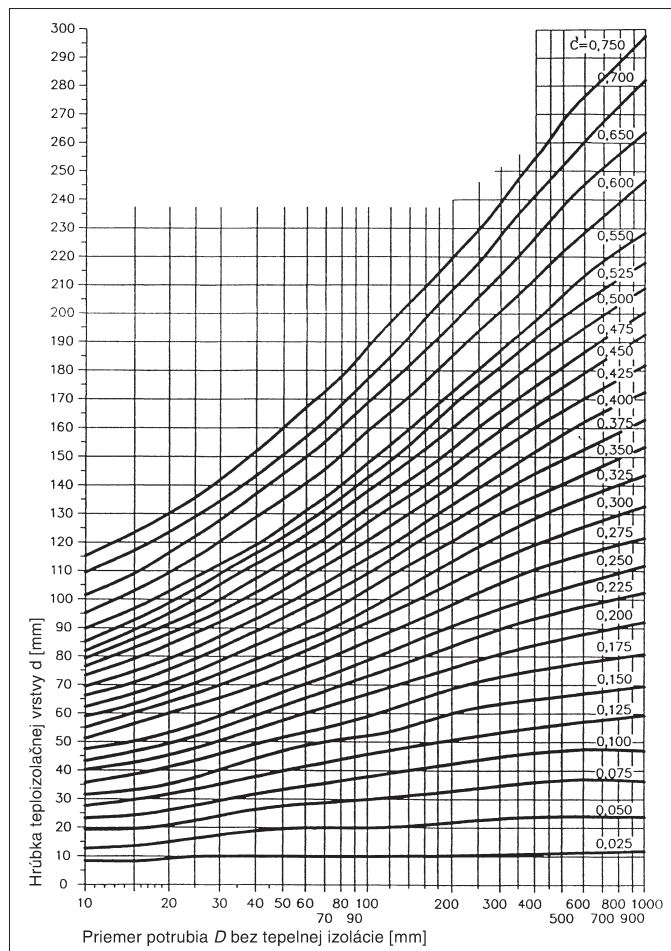


Diagram 1 Určenie hrúbky tepelnoizolačnej vrstvy potrubia pri danej hustote tepelného toku alebo pre stanovenú povrchovú teplotu

Výpočet parametra hrúbky z rov. (29)

$$C' = 2 \cdot 0,068 \left( \frac{300 - 20}{63} - \frac{1}{5,7} \right) = 0,58 \text{ m.}$$

Výsledok (odčítame z diagramu 1): d = 200 mm.

#### 2.2 Návrh hrúbky tepelnoizolačnej vrstvy pre stanovenú povrchovú teplotu

Povrchovú teplotu je možné vypočítať podľa rovnice

$$\Theta_{se} - \Theta_a = \frac{R_{se}}{R_T} (\Theta_i - \Theta_a) \quad [K] \quad (30)$$

$R_T$  je pre rovné steny definované rovnicou (26), pre valcovité potrubia rovnicou (27) a pre tepelne izolované duté guľovité tvary rovnicou (28). Pre praktický návrh hrúbky izolácie nám poslúži diagram 1. Podobne ako v predchádzajúcom prípade (pri danej hodnote lineárneho tepelného toku) musíme vypočítať pomocnú hodnotu parametra hrúbky  $C'$  podľa rovnice:

$$C' = \frac{2 \cdot \lambda}{h_{se}} \left( \frac{\Theta_{im} - \Theta_a}{\Theta_{se} - \Theta_a} - 1 \right) \quad [m] \quad (31)$$

Z vypočítanej hodnoty parametra hrúbky a priemeru potrubia navrhne požadovanú hrúbku tepelnej izolácie z diagramu 1, (príklad b).

**Príklad b):**

daná je povrchová teplota  $\Theta_{se}$

$$\begin{aligned} \Theta_{im} = 120 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \lambda = 0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \\ \Theta_a = 20 \text{ }^\circ\text{C} & \quad D = 0,108 \text{ m} \\ \Theta_{se} = 25 \text{ }^\circ\text{C} & \quad h_{se} = 4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad \varphi = 85 \% \end{aligned}$$

Výpočet parametra hrúbky z rov. (31)

$$C' = \frac{2 \cdot 0,045}{5,4} \left( \frac{120 - 20}{25 - 20} - 1 \right) = 0,380 \text{ m}$$

Výsledok (odčítame z diagramu 1):  $d = 85 \text{ mm}$ .

**2.3 Návrh hrúbky tepelnoizolačnej vrstvy proti kondenzácii**

Pre optimálny návrh kvality a hrúbky izolácie proti kondenzácii je nutné správne odhadnúť relatívnu vlhkosť prostredia, v ktorom sa izolované zariadenie bude prevádzkovať. Optimálna hrúbka izolácie závisí predovšetkým od *relatívnej vlhkosti prostredia a teploty chladiacej látky*. Teplota prostredia ovplyvňuje hrúbku izolácie menej ako predchádzajúce dva parametre, ale vždy je nutné počítať s najvyššou možnou teplotou.

Okrajové podmienky pre výpočet hrúbky izolácie proti kondenzácii vodnej pary na potrubí sú:

- teplota chladiacej látky,
- teplota okolitého vzduchu,
- priemer potrubia bez tepelnej izolácie,
- relatívna vlhkosť okolitého vzduchu,
- prípustná hodnota povrchovej teploty na izolácii potrubia, pri ktorej nedochádza ku kondenzácii vodných pár.

Kondenzácia vodných pár nezávisí len od podmienok ovplyvňujúcich povrchovú teplotu, ale aj od relatívnej vlhkosti okolitého vzduchu, pričom práve túto hodnotu je veľmi často ťažko presne určiť. Čím je relatívna vlhkosť vyššia, tým ťažšie sa dá presne odhadnúť, pretože pri vyšších vlhkostiach má aj drobné zakolísanie vlhkosti alebo povrchovej teploty veľký účinok. Použitím rovnice (30) možno hrúbku tepelnej izolácie potrebnej na zabránenie kondenzácie vodných pár stanoviť aj iteráčnym spôsobom. Prípustný teplotný rozdiel medzi povrchom a okolitým vzduchom pre rozličné vlhkosti vzduchu, pri ktorom ešte nenastáva kondenzácia vodných pár, sa uvádza v tab. 3. Podľa uvedenej tabuľky zistíme najvyššiu teplotu povrchu, pri ktorom ešte nenastáva kondenzácia vodných pár. Táto hodnota sa dosadí do známeho vzorca parametra hrúbky pre danú povrchovú teplotu, zo ktorého navrhne hrúbku izolácie. Pre praktický návrh hrúbky izolácie nám poslúži diagram 1. Podobne ako v predchádzajúcich prípadoch (pri danej hodnote lineárneho tepelného toku alebo stanovenej povrchovej teplote) musíme vypočítať pomocnú hodnotu parametra hrúbky  $C'$  podľa rovnice (31), kde hodnota  $\Theta_{se}$  je prípustná povrchová teplota na vonkajšom povrchu (resp. do menovateľa dosadíme prípustný pokles teploty z tab. 3).

$$C' = \frac{2 \cdot \lambda}{h_{se}} \left( \frac{\Theta_{im} - \Theta_a}{\Theta_{se} - \Theta_a} - 1 \right) \quad [m]$$

Z vypočítanej hodnoty parametra hrúbky a priemeru potrubia navrhne požadovanú hrúbku tepelnej izolácie z diagramu 1, (príklad c).

**Príklad c):**

daná je povrchová teplota  $\Theta_{se}$  ako prevencia proti kondenzácii vodnej pary

$\Theta_{se}$  odčítame z tab. 3

$$\Theta_{im} = -20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\Theta_a = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad D = 0,108 \text{ m}$$

$$h_{se} = 4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \quad \varphi = 85 \%$$

Podľa tabuľky 3:  $\Theta_{se} = \Theta_a - \Delta\Theta = 20 - 2,6 = 17,4 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C' = \frac{2 \cdot \lambda}{h_{se}} \left( \frac{\Theta_{im} - \Theta_a}{\Theta_{se} - \Theta_a} - 1 \right) = \frac{2 \cdot 0,039}{5,4} \left( \frac{-20 - 20}{2,6} - 1 \right) = 0,208 \text{ m}$$

Výsledok (odčítame z diagramu 1):  $d = 70 \text{ mm}$ .

Príklad: Pri teplote okolia  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a relatívnej vlhkosti vzduchu  $70 \%$  sa prípustná povrchová teplota rovná  $20 \text{ }^\circ\text{C} - 5,6 \text{ }^\circ\text{C} = 14,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tab. 3 Prípustný teplotný rozdiel, v  $^\circ\text{C}$ , medzi povrchom a okolitým vzduchom pre rozličné relatívne vlhkosti vzduchu, pri ktorom ešte nenastáva kondenzácia vodných pár

Teplota okolitého vzduchu, $\Theta_a$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Relatívna vlhkosť vzduchu $\varphi$ , [%]														
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	
-20	-	10,4	9,1	8,0	7,0	6,0	5,2	4,5	3,7	2,9	2,3	1,7	1,1	0,5	
-15	12,3	10,8	9,6	8,3	7,3	6,4	5,4	4,6	3,8	3,1	2,5	1,8	1,2	0,6	
-10	12,9	11,3	9,9	8,7	7,6	6,6	5,7	4,8	3,9	3,2	2,5	1,8	1,2	0,6	
-5	13,4	11,7	10,3	9,0	7,9	6,8	5,8	5,0	4,1	3,3	2,6	1,9	1,2	0,6	
0	13,9	12,2	10,7	9,3	8,1	7,1	6,0	5,1	4,2	3,5	2,7	1,9	1,3	0,7	
2	14,3	12,6	11,0	9,7	8,5	7,4	6,4	5,4	4,6	3,8	3,0	2,2	1,5	0,7	
4	14,7	13,0	11,4	10,1	8,9	7,7	6,7	5,8	4,9	4,0	3,1	2,3	1,5	0,7	
6	15,1	13,4	11,8	10,4	9,2	8,1	7,0	6,1	5,1	4,1	3,2	2,3	1,5	0,7	
8	15,6	13,8	12,2	10,8	9,6	8,4	7,3	6,2	5,1	4,2	3,2	2,3	1,5	0,8	
10	16,0	14,2	12,6	11,2	10,0	8,6	7,4	6,3	5,2	4,2	3,3	2,4	1,6	0,8	
12	16,5	14,6	13,0	11,6	10,1	8,8	7,5	6,3	5,3	4,3	3,3	2,4	1,6	0,8	
14	16,9	15,1	13,4	11,7	10,3	8,9	7,6	6,5	5,4	4,3	3,4	2,5	1,6	0,8	
16	17,4	15,5	13,6	11,9	10,4	9,0	7,8	6,6	5,4	4,4	3,5	2,5	1,7	0,8	
18	17,8	15,7	13,8	12,1	10,6	9,2	7,9	6,7	5,6	4,5	3,5	2,6	1,7	0,8	
20	18,1	15,9	14,0	12,3	10,7	9,3	8,0	6,8	5,6	4,6	3,6	2,6	1,7	0,8	
22	18,4	16,1	14,2	12,5	10,9	9,5	8,1	6,9	5,7	4,7	3,6	2,6	1,7	0,8	
24	18,6	16,4	14,4	12,6	11,1	9,6	8,2	7,0	5,8	4,7	3,7	2,7	1,8	0,8	
26	18,9	16,6	14,7	12,8	11,2	9,7	8,4	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,8	0,9	
28	19,2	16,9	14,9	13,0	11,4	9,9	8,5	7,2	6,0	4,9	3,8	2,8	1,8	0,9	
30	19,5	17,1	15,1	13,2	11,6	10,1	8,6	7,3	6,1	5,0	3,8	2,8	1,8	0,9	
35	20,2	17,7	15,7	13,7	12,0	10,4	9,0	7,6	6,3	5,1	4,0	2,9	1,9	0,9	
40	20,9	18,4	16,1	14,2	12,4	10,8	9,3	7,9	6,5	5,3	4,1	3,0	2,0	1,0	
45	21,6	19,0	16,7	14,7	12,8	11,2	9,6	8,1	6,8	5,5	4,3	3,1	2,1	1,0	
50	22,3	19,7	17,3	15,2	13,3	11,6	9,9	8,4	7,0	5,7	4,4	3,2	2,1	1,0	

### 3. VÝPOČET ČASU OCHLADENIA, PRI KTOROM SA ZABRÁNI ZAMRZNUTIU VODY V POTRUBÍ PRI DANEJ HRÚBKKE TEPELNEJ IZOLÁCIE

Zabráníť zamrznutiu potrubia, aj keď je tepelne izolované, počas dlhého časového obdobia nie je možné. Akonáhle tekutina (zvyčajne voda) v potrubí zostane stáť, začína chladnutie. Lineárna hustota tepelného toku,  $q_l$ , stojatej tekutiny je rovnako závislá od tepelnej kapacity vody  $c_{pw}$ ,  $m_w$  a materiálu potrubia  $c_{pp}$ ,  $m_p$ , ako aj od merného skupenského tepla tuhnutia vody. Ak je  $m_p \cdot c_{pp} < m_w \cdot c_{pw}$ , potom je  $m_p \cdot c_{pp}$  zanedbateľné.

Čas ochladenia až po začiatok zamrznania sa vypočíta podľa rovníc

$$t_{wp} = \frac{(\Theta_{im} - \Theta_a) \cdot (m_w \cdot c_{pw} + m_p \cdot c_{pp}) \cdot \ln \frac{(\Theta_{im} - \Theta_a)}{(\Theta_{im} - \Theta_a)}}{q_{wp} \cdot 3,6 \cdot l} \quad [\text{h}] \quad (32)$$

Pritom je:

$$q_{wp} = \frac{\pi \cdot (\Theta_{im} - \Theta_a)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D_e}{D_i} + \frac{1}{h_{se} \cdot D_e}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (33)$$

kde

- $l$  je dĺžka potrubia, v m;
- $\Theta_{im}$  – teplota prúdiacej látky na začiatku procesu, v °C;
- $\Theta_{fm}$  – teplota prúdiacej látky na konci procesu, v °C;
- $\Theta_a$  – teplota okolia, v °C;
- $c_{pp}$  – merná tepelná kapacita pri stálom tlaku, v  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;
- $m_w$  – hmotnosť vody, v kg;
- $m_p$  – hmotnosť materiálu potrubia, v kg.

V praxi sa môže pri výpočte  $q_{wp}$  potrubí zanedbať odpor pri prestupe tepla na vonkajšej strane. Ak sa porovnávajú tepelne izolované a neizolované potrubia, musí sa vo výpočte zohľadniť súčiniteľ prestupu tepla neizolovaného potrubia. Lineárna hustota tepelného toku,  $q_l$ , neizolovaného potrubia sa stanoví podľa rovnice

$$q_l = h_{se} \cdot (\Theta_{im} - \Theta_a) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_e \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (34)$$

Čas ochladenia je približným spôsobom daný rovnicou

$$t_{wp} = \frac{(m_w \cdot c_{pw} + m_p \cdot c_{pp}) \cdot (\Theta_{im} - \Theta_{fm})}{q_{wp} \cdot 3,6 \cdot l} \quad [\text{h}] \quad (35)$$

Čas ochladenia až po začiatok zamrznania (čas ochladenia) sa vypočíta už uvedeným postupom, pričom  $\Theta_{fm}$  je bod mrazu (tuhnutia) danej tekutiny.

Diagram 2 ukazuje príklady maximálne prípustných časov ochladenia vody so začiatočnou teplotou 5 °C do začiatku zamrznania pre rozličné priemery potrubí a rozličné teploty okolia.

#### 3.1 Výpočet času zamrznutia vody v potrubí

Čas zamrznutia závisí od tepelného toku a od priemeru potrubia. Daný je rovnicou

$$t_{fr} = \frac{f}{100} \cdot \frac{\rho_{lad} \cdot \pi \cdot D_{ip}^2 \cdot h_f}{q_{fr} \cdot 3,6 \cdot 4} \quad [\text{h}] \quad (36)$$

Pritom je:

$$q_{fr} = \frac{\pi \cdot (-\Theta_a)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D_e}{D_{ip}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (37)$$

- kde  $f$  – námraza – percento zmrznutej vody, v %;
- $D_{ip}$  – vnútorný priemer potrubia, v m;
- $h_f$  – merné skupenské teplo tuhnutia vody =  $334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- $\rho_{lad}$  – objemová hmotnosť ľadu pri 0 °C,  $\rho_{lad} = 920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Diagram 2 znázorňuje maximálne prípustné časy ochladenia vody, pri ktorých ešte nenastáva zamrznutie, v potrubíach rozličných priemerov a s rozličnými hrúbkami tepelnej izolácie a pri rozličných teplotách okolia. Začiatočná teplota vody  $\Theta = 5 \text{ °C}$ , rýchlosť vetra  $v = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda = 0,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $h_e = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

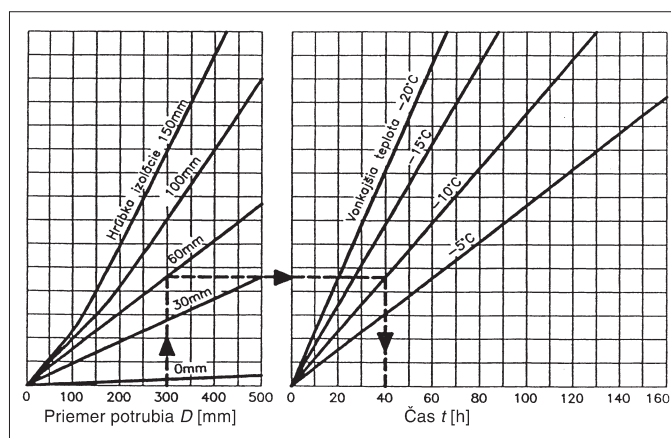


Diagram 2 Stanovenie časov ochladenia pri teplotnom rozdieli od 5 do 0 °C

#### Príklad:

Pre dané potrubie priemeru 300 mm, s hrúbkou tepelnej izolácie 60 mm a pri teplote okolitého vzduchu -10 °C je maximálne prípustný čas ochladenia vody v potrubí 40 h. Námraza  $f$ , v %, sa má zvoliť podľa požiadaviek, napr. 25 % ( $f = 25$ ).

Navrhovaniu kvality a hrúbky tepelnej izolácie v TZB sa doposiaľ stále nevenuje dostatočná pozornosť. Projektanti hrúbku izolácie často odhadujú len približne, často predpíšu rovnakú hrúbku izolácie napríklad pre rôzne priemery potrubia. Pri súčasných cenách tepla je nutné zvýšiť pozornosť aj izolačným materiálom a výpočtu optimálnej hrúbky.

Nová norma je súhrnom výpočtových vzťahov pre návrh hrúbky tepelnej izolácie potrubí, nádrží, zásobníkov a iných zariadení. Prínosom normy je pomocný diagram 1 pre návrh hrúbky podľa vypočítaného parametra  $C'$  a vzťahy pre výpočet zmeny teploty v potrubíach, nádržiach a zásobníkoch.

V prílohe normy sú vyriešené príklady pre praktický návrh a posúdenie hrúbky izolácie.

#### Použité zdroje:

- [1] TOMAŠOVIČ, P.-BEŤKO, B.-PERÁČKOVÁ, J.: *Zvuková a tepelná ochrana v technických zariadeniach budov*. 1. vydanie, Bratislava, Vydavateľstvo STU 2000
- [2] VALÁŠEK, J. a kol.: *Zdravotnětechnická zařízení a instalace*. Jaga group, v.o.s., Bratislava 2001
- [3] PERÁČKOVÁ, J.: *Návrh tepelnej izolácie potrubí chladiacej vody*. TZB Haustechnik, č. 6/1993
- [4] *Stanovenie hrúbky tepelnej izolácie na potrubí ústredného vykurovania a vnútorného vodovodu*. TZB Haustechnik, č. 1/1995

#### Normy:

- STN EN ISO 7345(73 0543) Tepelná izolácia. Fyzikálne veličiny a definície.1998.
- STN EN ISO 8497(73 0553) Tepelná izolácia. Stanovenie prechodu tepla pre kruhové potrubie v ustálenom stave. 2000.
- STN EN ISO 12241(73 0556) Tepelná izolácia technických zariadení budov a priemyselných prevádzok. Výpočtové pravidlá. 2001.