

Dimenzování kamen

Radim Pechal

radim.pechal@gmail.com

7. února 2014

Tato prezentace vznikla pro účely přednášky pro Cech kamnářů v
Olomouci 7. února 2014

Tato prezentace je šířena pod licencí Creative Commons
Uveďte autora-Neužívejte dílo komerčně-Nezasahujte do díla 3.0 Česko
(CC BY-NC-ND 3.0 CZ)

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/cz/>

Text neprošel jazykovou a technickou korekturou, autor neručí za chyby v
tomto textu

- Baumgartner G., Houfbauer H. a kol.: *Dimenzování kachlových kamen*, Rakouský svaz kachlových kamen, Zkušební a výzkumný ústav rakouských kamnářů, 1997.
- ČSN EN 15544: *Individuálně stavěná kachlová kamna/omítnutá kamna - Dimenzování*, 2013.
- ČSN EN 13384-1+A2: *Komíny - Tepelně technické a hydraulické výpočtové metody - Část 1: Samostatné komíny*, 2009.

- 1 **Trocha fyziky**
- 2 Výpočet parametrů kamen
- 3 Výpočet parametrů tahového systému
- 4 Výpočet parametrů pro komín a jeho napojení
- 5 Zhodnocení výpočtu

Hydrostatický tlak

Máme nádobu plnou plynu, na dno tento plyn působí tlak

$$p_h = g \cdot h \cdot \rho$$

- g je konstanta $g = 9,81 \text{ N/kg}$
- h je výška nádoby [m]
- ρ je hustota plynu [kg/m^3]

Naše „nádobu“ je odtahové potrubí a plyn směs „spáleného“ vzduchu a kouře (spalin), jeho hustotu určíme jako

$$\rho = \rho_{vz} - \rho_{sp} = \frac{1,293}{f_t \cdot f_v} - \frac{1,282}{f_t \cdot f_v}$$

f_t je korekce na vliv teploty, f_v je korekce na vliv nadmořské výšky

Dynamický tlak

Popisuje tlak způsobený prouděním spalin, je dán rychlostí spalin v a jejich hustotou ρ

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2}$$

hustota závisí na teplotě a nadmořské výšce, používáme proto ve tvaru

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} f_t f_v$$

f_t je korekce na vliv teploty, f_v je korekce na vliv nadmořské výšky

Tření a odpor změny směru potrubí

Mezi nežádoucí tlaky patří tlak vyvolaný třením plynu o stěny

$$p_r = \frac{\lambda \cdot p_d}{D}$$

je dán dynamickým tlakem, koeficientem λ , který závisí na typu stěny a průřezem D

Další nežádoucí tlak je způsoben tzv. místními ztrátami, danými změnou směru či změnou průřezu, popsanych koeficientem ζ

$$p_u = \zeta p_r$$

Chceme, aby hydrostatický tlak byl co největší a zbylé - dynamický, tlak způsobený třením plynu o stěnu či tlak způsobený místními ztrátami - co nejmenší.

- 1 Trocha fyziky
- 2 **Výpočet parametrů kamen**
- 3 Výpočet parametrů tahového systému
- 4 Výpočet parametrů pro komín a jeho napojení
- 5 Zhodnocení výpočtu

Ukázka možného programu

Jmenovitý tepelný výkon: 3,3 kW
 Jmenovitá topná doba: 11 h
 Nadmořská výška: 600 m

Typ konstrukce: 1

- 1 ... konstrukce se vzduchovou mezerou
 - 0 ... konstrukce bez vzduchové mezery

Velikost vnitřní plochy SK: 10052 cm²
 Svislý spalovací prostor: x= 40 cm
 y= 35 cm
 Zvolená plocha SP: 1400 cm²
 Minimální plocha základny: 1117 cm²
 Maximální plocha základny: 1452 cm²
 Výška spalovacího prostoru: 48,3 cm

Vodorovný spalovací prostor:
 h= 40 cm
 x= 30 cm
 Minimální výška SK: 36 cm
 Maximální výška SK: 46 cm
 y= 54,7 cm

Maximální množství paliva: 11,2 Kg
 Minimální množství paliva: 5,6 Kg
 Optimální spotřeba paliva: 8,7 Kg/h

Průřez palinové štěrbin: 11 cm²
 Srupeň účinnosti: 79 %
 Minimální délka tahu: 5,01 m

Maximální tlakový rozdíl: 1,79 Pa

Skutečný tlakový rozdíl: 1,61 Pa

	Šířka [cm]	Výška [cm]	Délka [cm]	Vratný Úhel [°]	Směr	Výška [cm]	t [°C]	v [m/s]	Ph [Pa]	Pd [Pa]	lambda	Pr [Pa]	Ksi	Pu [Pa]
Přívod vzduchu:														
Průřez svislého roštu:			157				5	2,13		2,65			0,60	1,59
Spalovací prostor:	40	35	50		1	50	700		4,2					
Tah topného plynu:														
1	20	20	27	0	0	0	538	2,44	0,0	1,19	0,044		0,07	0,00
2	20	20	44	90	-1	-44	507	2,35	-3,4	1,15	0,044		0,11	1,20
3	20	20	53	90	0	0	468	2,23	0,0	1,09	0,044		0,13	1,20
4	20	20	24	90	1	24	439	2,14	0,5	1,05	0,044		0,05	1,20
5	20	20	27	90	0	0	421	2,09	0,0	1,02	0,044		0,06	1,20
6	20	18	60	90	1	60	392	2,22	4,5	1,21	0,044		0,17	1,21
7	20	16	88	90	0	0	347	2,33	0,0	1,42	0,046		0,32	1,21

Ukázka možného programu

8	20	16	20	90	1	20	317	2,22	1,2	1,36	0,046	0,07	1,20	1,63
9	20	16	68	90	0	0	295	2,14	0,0	1,30	0,046	0,23	1,20	1,57
10	20	16	20	90	1	20	274	2,06	1,3	1,26	0,046	0,06	1,20	1,51
11	20	12	68	90	0	0	255	2,65	0,0	2,16	0,049	0,47	1,26	2,72
12	24	16	20	90	1	20	237	1,60	1,2	0,81	0,044	0,04	1,56	1,27
Spojovací prvek:						tk=	233	C						
Průměr roury:						0	229	3,42	0,0	3,78	0,033	0,50	1,49	5,64
tloušťka stěny:							224							
Komin:						600	174	2,75	27,87	2,74	0,050	5,85	1,21	3,34
lambda a stěny:														
Vnitřní složka:														
Izolace:														
Vnější plášť:														
x=														
y=														
Pomocné výpočty pro spojovací prvek:														
Viskozita	vsp	rhosp	Re	cp	lambdaA	Pr	Psi	Nu	alfa	lambda	1/Lambda	k	Psi	
2,49E-05	3,4	0,558	11604	1156	0,037	0,768	1,15	47	11,6393	50	0,000020	4,778	0,04	
Pomocné výpočty pro komin:														
Viskozita	vsp	rhosp	Re	cp	lambdaA	Pr	Psi	Nu	alfa		1/Lambda	k	Psi	
2,45E-05	3,1	0,546	9523	1153	0,037	0,767	1,26	35	9,0969		0,364299	1,931	0,53	

Vstupní parametry

Pro výpočet tahu kamen si musíme určit nejdříve následující parametry:

- jmenovitý tepelný výkon P_{tep} [kW] - kolik „tepla“ je potřeba na pokrytí tepelných ztrát budovy, v případě, že se jedná pouze o částečné vytápění, bereme v úvahu pouze odpovídající část (od 2,7 do 12 kW)
- jmenovitá topná doba t_{vyt} [h] - jak dlouho se bude v kamnech topit (8 až 24 hodin)
- nadmořská výška kamen h_{kam} [m n m] (metry nad mořem)
- typ konstrukce - se vzduchovou mezerou či bez vzduchové mezery

Pro náš modelový výpočet si zvolíme $P_{\text{tep}} = 3,3 \text{ kW}$, $t_{\text{vyt}} = 11 \text{ h}$,
 $h_{\text{kam}} = 600 \text{ mm}$, konstrukce se vzduchovou mezerou.

Maximální množství paliva

Maximální množství paliva m_{\max} [kg], které je potřeba pro jeden cyklus vytápění, určíme ze vztahu

$$m_{\max} = \frac{P_{\text{tep}} \cdot t_{\text{vyt}}}{H\nu},$$

- P_{tep} [kW] - jmenovitý tepelný výkon
- t_{vyt} [h] - jmenovitá topná doba
- H - výhřevnost použitého dřeva [$\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$]
- ν - stupeň účinnosti

Obvykle se předpokládá výhřevnost dřeva $4,16 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ a stupeň účinnosti 78% (tedy $\nu = 0,78$)

$$m_{\max} = \frac{P_{\text{tep}} \cdot t_{\text{vyt}}}{3,25}$$

V našem případě

$$m_{\max} = \frac{3,3 \cdot 11}{3,25} = 11,2 \text{ kg}$$

Minimální a optimální množství paliva

Jako minimální množství paliva m_{\min} [kg] bereme polovinu maximálního množství paliva

$$m_{\min} = \frac{m_{\max}}{2}$$

Jako optimální množství paliva m_{opt} [kg/h], kdy by kamna měla mít minimální emise, bereme

$$m_{\text{opt}} = 0,78 \cdot m_{\max}$$

Určuje, jak rychle máme přikládat (doba topení $t = m_{\max}/m_{\text{opt}}$ [h])
V našem případě

$$m_{\min} = \frac{11,2}{2} = 5,6 \text{ kg}, m_{\text{opt}} = 0,78 \cdot 11,2 = 8,7 \text{ kg/h}$$

Rozměry spalovací komory

Minimální rozměry jsou dány množstvím paliva m_{\max} , maximální rozměry nesmí být moc veliké, aby příliš neklesla teplota ve spalovacím prostoru.

Určíme z maximálního množství paliva m_{\max} .

Určíme:

- Velikost vnitřní plochy spalovací komory S_{sk} [cm²]

$$S_{sk} = 900 \cdot m_{\max}$$

Typ spalovacího prostoru:

- Svislý spalovací prostor (určíme si rozměry základny a dopočítáme výšku)
- Vodorovný spalovací prostor (zvolíme výšku a dopočítáme základnu)

Svislý násypný prostor

Zvolíme základnu $x \times y$ [cm], tak aby plocha základny $S_{zakl} = x \cdot y$ byla v rozmezí

- Minimální plocha základny $S_{zaklmin}$ [cm²]

$$S_{zaklmin} = 100 \cdot m_{max}$$

- Maximální plocha základny $S_{zaklmax}$ [cm²]

$$S_{zaklmax} = 130 \cdot m_{max}$$

Výšku spalovacího prostoru h_{sk} pak určíme

$$h_{sk} = \frac{900m_{max} - 2 \cdot S_{zakl}}{2 \cdot (x + y)}$$

(Násypku volíme tak, aby bylo možné vložit 33 cm dlouhé poleno)

Svislý násypný prostor

V našem případě $m_{\max} = 11,2$ kg.

$$S_{\text{zaklmin}} = 100 \cdot 11,2 = 1120 \text{ cm}^2$$

$$S_{\text{zaklmax}} = 130 \cdot 11,2 = 1456 \text{ cm}^2$$

Zvolíme si $x = 30$ cm a $y = 40$ cm ($S_{\text{zakl}} = 1200 \text{ cm}^2$) a určíme výšku spalovacího prostoru

$$h_{sk} = \frac{900 \cdot 11,2 - 2 \cdot 1200}{2 \cdot (40 + 30)} = 54,9 \text{ cm}$$

Vodorovný násypný prostor

Zvolíme výšku h_{sk} [cm], tak aby byla v rozmezí

- Minimální výška spalovacího prostoru h_{sk} [cm]

$$h_{skmin} = 25 + m_{max}$$

- Maximální výška spalovacího prostoru h_{sk} [cm]

$$h_{skmax} = 35 + m_{max}$$

Zvolíme rozměr základny x [cm] a dopočítáme druhý rozměr

$$y = \frac{900 \cdot m_{max} - 2x \cdot h_{sk}}{2(x + h_{sk})}$$

Požadujeme, aby $x, y \geq 23$ cm a pro poměr stran x/y platilo

$$0,5 \leq x/y \leq 2$$

Svislý násypný prostor

V našem případě $m_{\max} = 11,2$ kg.

$$h_{\text{skmin}} = 25 + 11,2 = 36,2 \text{ cm}$$

$$h_{\text{skmax}} = 35 + 11,2 = 46,2 \text{ cm}$$

Zvolíme $h_{\text{sk}} = 40$ cm a $x = 30$ cm a dopočítáme

$$y = \frac{900 \cdot 11,2 - 2 \cdot 30 \cdot 40}{2(40 + 30)} = 54,9 \text{ cm}$$

Minimální délka tahu

Rozlišuje se zařízení se vzduchovou mezerou a bez vzduchové mezery
Pro tyto dva typy můžeme spočítat minimální délku tahu l_{\min} [m]

- bez vzduchové mezery

$$l_{\min} = 1,3\sqrt{m_{\max}}$$

- se vzduchovou mezerou

$$l_{\min} = 1,5\sqrt{m_{\max}}$$

V našem případě $m_{\max} = 11,2$

- bez vzduchové mezery

$$l_{\min} = 1,3\sqrt{11,2} = 4,43 \text{ m}$$

- se vzduchovou mezerou

$$l_{\min} = 1,5\sqrt{11,2} = 5,01 \text{ m}$$

Průřez plynové štěrby

Plynová (spalinová) štěrbina je otvor pro zkrácení topného tahu, používá se při zatápění.

Průřez plynové štěrby S_{pls} [cm²] snadno určíme

$$S_{\text{pls}} = 1 \cdot m_{\text{max}}$$

V našem případě $m_{\text{max}} = 11,2$ kg, tedy $S_{\text{pls}} = 11,2$ cm²

- 1 Trocha fyziky
- 2 Výpočet parametrů kamen
- 3 **Výpočet parametrů tahového systému**
- 4 Výpočet parametrů pro komín a jeho napojení
- 5 Zhodnocení výpočtu

Spalovací prostor

Určili jsme rozměry spalovacího prostoru $x \times y$ s výškou h_{sp} .
Teplota ve spalovacím prostoru se předpokládá $t_{\text{sp}} = 700^\circ\text{C}$.
Hydrostatický tlak p_h určíme pomocí vztahu

$$p_h = 9,02 \cdot h_{\text{sp}} \cdot \exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right)$$

výšku spalovacího prostoru h_{sp} musíme zadat v metrech, pokud zadáváme v centimetrech, upravíme vztah

$$p_h = 0,0902 \cdot h_{\text{sp}} \cdot \exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right)$$

V našem případě $h_{\text{sp}} = 50 \text{ cm}$ a $h_{\text{kam}} = 600 \text{ mm}$, tedy

$$p_h = 0,0902 \cdot 50 \cdot \exp\left(\frac{-9,81 \cdot 600}{78624}\right) = 4,2 \text{ Pa}$$

Tah topného systému

Postupně zadáváme části topného systému, šířku, výšku, délku d_d , vratný úhel a směr (kde je výstupní otvor dané části). Pokud je směr:

- dolů – efektivní výška dílu $h_d = -d_d$
- nahoru – $h_d = d_d$
- vlevo či vpravo – $h_d = 0$

Teplotu dílu t_d [°C] určíme ze vztahu

$$t_d = 500 \exp\left(\frac{-0,83l}{100 \cdot l_{\min}}\right)$$

- l_{\min} je již vypočtená minimální délka tahu
- pro první tah $l_1 = d_1/2$ [cm], pro druhý tah $l_2 = d_1 + d_2/2$ [cm], pro třetí tah $l_3 = d_1 + d_2 + d_3/2$ [cm], ...

V našem případě například pro třetí část tahu

$$t_2 = 500 \exp\left(\frac{-0,83 \cdot (27 + 44 + 53/2)}{100 \cdot 5,01}\right) = 468^\circ\text{C}$$

Tah topného systému

Část topného systému se šířkou x_d , výškou y_d , délkou d_d [cm], u kterého jsme si vypočítali teplotu t_d

Rychlost proudění splodin v_d [m/s] v této části určíme ze vztahu

$$v_d = 0,00273 \cdot m_{\max} \frac{273 + t_d}{273} \frac{1}{\exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right)} \cdot \frac{10000}{x_d \cdot y_d}$$

- h_{kam} je nadmořská výška kamen [m n m]
- m_{\max} je maximální množství paliva [kg]
- x_d, y_d šířka a výška části tepného systému [cm]
- t_d je teplota části

V našem případě například pro třetí část tahu $t_d = 468^\circ\text{C}$, $x_d = 20$ cm, $y_d = 20$ cm, $m_{\max} = 11,2$, $h_{\text{kam}} = 600$ mm

$$v_d = 0,00273 \cdot 11,2 \cdot \frac{273 + 468}{273} \frac{1}{\exp\left(\frac{-9,81 \cdot 600}{78624}\right)} \cdot \frac{10000}{20 \cdot 20} = 2,2 \text{ m/s}$$

Tah topného systému

Hydrostatický tlak p_{hd} části topného systému vypočteme ze vztahu

$$p_{hd} = 0,0982 \cdot h_d \cdot \exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{kam}}{78624}\right) \cdot \left(1,293 - \frac{350}{273 + t_d}\right)$$

- h_d je efektivní výška části (závisí na směru)
- t_d je teplota části topného systému
- h_{kam} je nadmožská výška kamen.

V našem případě pro čtvrtou část topného systému $t_d = 439^\circ\text{C}$,
 $h_d = 24\text{ cm}$, $h_{kam} = 600\text{ mm}$

$$p_{hd} = 0,0982 \cdot 24 \cdot \exp\left(\frac{-9,81 \cdot 600}{78624}\right) \cdot \left(1,293 - \frac{350}{273 + 439}\right) = 1,75\text{ Pa}$$

Tah topného systému

Dynamický tlak p_{dd} části topného systému vypočteme

$$p_{dd} = \frac{175v_d^2}{273 + t_d} \exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{kam}}{78624}\right)$$

- v_d je vypočtená rychlost proudění spalin
- t_d je teplota části topného systému
- h_{kam} je nadmožská výška kamen

V našem případě pro čtvrtou část topného systému $t_d = 439^\circ\text{C}$,
 $v_d = 2,14 \text{ m/s}$, $h_{kam} = 600 \text{ mm}$

$$p_{dd} = \frac{175 \cdot 2,14^2}{273 + 439} \exp\left(\frac{-9,81 \cdot 600}{78624}\right) = 1,05 \text{ Pa}$$

Tah topného systému

Část topného systému se šířkou x_d , výškou y_d , délkou d_d [cm].

Koeficient tření λ_d

$$\lambda_d = \frac{1}{1,14 + 2,0 \log \left(\frac{2 \cdot x_d \cdot y_d}{100(x_d + y_d)k_f} \right)}$$

(log značí logaritmus o základu 10)

- $k_f = 0,002$ pro šamotové roury, $k_f = 0,003$ pro šamotové desky

V našem případě pro šamotové desky $x_d = 20$ cm, $y_d = 20$ cm

$$\lambda_d = \frac{1}{1,14 + 2,0 \log \left(\frac{2 \cdot 20 \cdot 20}{100(20 + 20) \cdot 0,003} \right)} = 0,044$$

Tah topného systému

Část topného systému se šířkou x_d , výškou y_d , délkou d_d [cm].

Tlak vyvolaný třením plynu o stěny

$$p_r = \frac{\lambda_d \cdot p_{dd} \cdot d_d \cdot (x_d + y_d)}{2 \cdot x_d \cdot y_d}$$

- p_{dd} je dynamický tlak části tahu topného systému

V našem případě pro čtvrtou část $x_d = 20$ cm, $y_d = 20$ cm, $d_d = 24$ cm, $\lambda_d = 0,044$, $p_{dd} = 1,05$ Pa

$$p_r = \frac{0,044 \cdot 1,05 \cdot 24 \cdot (20 + 20)}{2 \cdot 20 \cdot 20} = 0,05 \text{ Pa}$$

Tah topného systému

Odpor vyvolaný změnou směru potrubí p_{ud} části topného systému vypočítáme vztahem

$$p_{ud} = \zeta_d \cdot p_{dd}$$

- p_{dd} je dynamický tlak dané části
- ζ_d je koeficient odporu vyvolaného změnou směru, vysvětlíme dále

Koeficient odporu ζ_d určíme z vratného úhlu α_d

$$\zeta_d = \frac{1,2}{90} \alpha_d$$

Tah topného systému

Ovšem pokud je tah s průřezem $x_d \times y_d$ krátký tedy, pro jeho délku d_d platí

$$d_d < \frac{0,02 \cdot x_d \cdot y_d}{x_d + y_d}$$

je nutné provést následující výpočet:

$$\zeta_1 = \frac{1,2}{90} \alpha_1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{1,2}{90} (180 - 2 \cdot \alpha_2 - 2 \cdot \alpha_1) \left(1 - \frac{d_d \cdot (x_d + y_d)}{0,02 \cdot x_d \cdot y_d} \right)$$

$$\zeta_2 = \frac{1,2}{90} \alpha_2 + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \frac{1,2}{90} (180 - 2 \cdot \alpha_2 - 2 \cdot \alpha_1) \left(1 - \frac{d_d \cdot (x_d + y_d)}{0,02 \cdot x_d \cdot y_d} \right)$$

- α_1 je úhel, který tento díl svírá s předchozím dílem (α_{d-1})
- α_2 je úhel, který tento díl svírá s následujícím dílem (α_d)
- ζ_1 je přepočítaný koeficient odporu pro předchozí díl ($\zeta_{d-1} = \zeta_1$)
- ζ_2 je přepočítaný koeficient odporu pro krátký díl ($\zeta_d = \zeta_2$)

Tah topného systému

Zároveň pokud dochází ke změně průřezu potrubí, tedy přecházíme z dílu s průřezem $x_{d-1} \times y_{d-1}$ do dílu s průřezem $x_d \times y_d$ musíme připočítat vliv změny průřezu

$$\zeta_{dzp} = \left(\frac{x_d \cdot y_d}{x_{d-1} \cdot y_{d-1}} - 1 \right)^2$$

v případě, že potrubí nemá obdélníkový průřez (např. spojovací prvek) ale kruhový o průměru R_d , musíme ve vzorci nahradit $x \cdot y$ za $\pi R_d^2/4$

Vypočtenou ζ_{dzp} přičteme k ζ_d

Tah + spojovací prvek

Určili jsme všechny části tahu, můžeme spočítat délku tahu l_{tah} [m] jako součet délek všech částí d_1, d_2, \dots [cm]

$$l_{\text{tah}} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots}{100}$$

Určíme teplotu na konci tahu t_k

$$t_k = 500 \exp\left(\frac{-0,83 \cdot t_{\text{tah}}}{l_{\text{min}}}\right)$$

l_{min} je vypočtená minimální délka tahu

A určíme stupeň účinnosti ν [%]

$$\nu = 101,09 - 0,0942 \cdot t_k - 0,000006275 \cdot t_k^2 - 0,000000003173 \cdot t_k^3$$

Přívod vzduchu

Určíme si průřez přívodu vzduchu S_{prvz} [cm²]

$$v_d = 0,00273 \cdot m_{\text{max}} \frac{273 + t_{\text{prvz}}}{273} \frac{1}{\exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right)} \cdot \frac{S_{\text{prvz}}}{10000}$$

- h_{kam} je nadmořská výška kamen
- t_{prvz} je teplota nasávaného vzduchu (5°C)

Pro svislý rošt předpokládáme $\lambda_{\text{pv}} = 0,6$

Tlaky p_{prd} a p_{pru} vypočteme stejně jako pro tah topného systému

- 1 Trocha fyziky
- 2 Výpočet parametrů kamen
- 3 Výpočet parametrů tahového systému
- 4 **Výpočet parametrů pro komín a jeho napojení**
- 5 Zhodnocení výpočtu

Spojovací díl

Spojovací díl se ochlazuje jinak než šamotový tah, musíme postupovat složitěji a spočítat koeficient ochlazování Φ .

U spojovacího dílu tak musíme znát materiál, ze kterého je vyroben (a jemu příslušící konstanty).

Nejdříve vypočteme teplotu na vstupu do spojovacího dílu

$$t_k = 500 \exp\left(\frac{-0,83 l_{\text{tah}}}{100 \cdot l_{\text{min}}}\right)$$

- l_{min} je vypočtená minimální délka tahu
- l_{tah} je skutečná délka tahu

Součinitel chladnutí

Dále potřebujeme znát dynamickou viskozitu spalin ν [N/s/m²] při střední teplotě spalin t_k [°C]

$$\nu = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} t_k - 20 \cdot 10^{-12} t_k^2$$

Dále při známé rychlosti spalin v_{sp} [m/s] určíme Reynoldsovo číslo Re



$$Re = \frac{v_{sp} \cdot D \cdot \rho_{sp}}{\nu}$$

- D [m] je pro kruhový průřez rovno průměru ($D = d/100$, d [cm]), pro obdélníkový průřez s průřezem $x \times y$ [cm] $D = 0,02 \cdot x \cdot y / (x + y)$
- ρ_{sp} je hustota spalin

$$\rho_{sp} = \exp\left(\frac{-9.81 \cdot h_{kam}}{78624}\right) \cdot \left(1,293 - \frac{349,986}{273 + t_k}\right)$$

- h_{kam} je nadmořská výška kamen [m n m]

Součinitel chladnutí

Rychlost proudění v_{sp} určíme již známým vztahem

$$v_d = 0,00273 \cdot m_{\max} \frac{273 + t_d}{273} \frac{1}{\exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right)} \cdot \frac{10000}{S}$$

$S = 3,14 \cdot d^2/40000$ pro válcový spojovací prvek, $S = x_k \cdot y_k/10000$ pro komín s čtvercovou podstavou.

A dále určíme Prandtlovo číslo Pr

$$Pr = \frac{\nu c_p}{\lambda_A}$$

přičemž pro měrnou tepelnou kapacitu spalin ze dřeva (s relativní vlhkostí 23,1%) c_p platí

$$c_p = \frac{1011 + 0,05t_k + 0,0003t_k^2 + (15,4 + 0,016t_k - 0,000011t_k^2) \cdot 20,5}{1 + 0,0111 \cdot 20,5}$$

λ_A [W/m/K] je součinitel vodivosti spalin

$$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065t_k$$

Součinitel chladnutí

Pak určíme Nusseltovo číslo Nu

$$Nu = \Psi \cdot 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{l} \right) \right]$$

- D [m] je pro kruhový průřez rovno průměru ($D = d/100$, d [cm]), pro obdélníkový průřez s průřezem $x \times y$ [cm] $D = 0,02 \cdot x \cdot y / (x + y)$
- l je délka spojovacího prvku (výška komínu)
- Reynoldsovo číslo Re , Prandtlovo číslo Pr jsme si spočítali
- Ψ což je poměr součinitelů tření¹ určíme z tabulek - $\Psi = 1,15$ pro svařované roury, $\Psi = 1,26$ šamotové roury a plechové kanály falcované, $\Psi = 1,32$ betonové kanály a broušené zděné kanály

Musí ale platit $2300 < Re < 10^7$ a $0,6 < Pr < 1,5$ a $\Psi < 3$

¹V literatuře se uvádí jako $(\Psi/\Psi_{\text{smoot}})^{0,67}$.

Součinitel chladnutí

Nyní můžeme určit součinitel přestupu tepla α

$$\alpha = \frac{\lambda_a Nu}{D}$$

- D [m] je pro kruhový průřez rovno průměru ($D = d/100$, d [cm]), pro obdélníkový průřez $x \times y$ [cm] $D = 0,02 \cdot x \cdot y / (x + y)$
- $\lambda_A = 0,0223 + 0,000065 t_k$
- Nu je vypočtené Nusseltovo číslo

Součinitel chlazení

Dále určíme tepelný odpor $1/\Lambda$ [W/m²/K] použitého spojovacího dílu, buď jej udává výrobce, nebo pro spojovací díl spočítáme vztahem

$$\frac{1}{\Lambda} = y \frac{D_{\text{in}}}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_{\text{out}}}{D_{\text{in}}} \right)$$

- $y = 1$ pro kulatý vnitřní otvor, $y = 1,27$ pro čtvercový, $y = 1,3$ pro obdélníkový
- D_{in} , D_{out} závisí na tvaru
 - kruhový průřez s průměrem d [cm] a tloušťkou stěny d_{st} [cm] \rightarrow
 $D_{\text{in}} = d/100$, $D_{\text{out}} = (d + 2 \cdot d_{\text{st}})/100$
 - obdélníkový průřez $x \times y$ a tloušťkou stěny d_{st} \rightarrow
 $D_{\text{in}} = 4 \cdot (x \cdot y) / [200 \cdot (x + y)]$,
 $D_{\text{out}} = 4 \cdot [(x + 2 \cdot d_{\text{st}}) \cdot (y + 2 \cdot d_{\text{st}})] / [200 \cdot (x + y + 4 \cdot d_{\text{st}})]$
- λ závisí na použitém materiálu (nalezneme např. v ČSN EN 13384-1+A2 - tabulka B.5) $\lambda = 50$ W/m/K – ocel, $\lambda = 17$ W/m/K – korozivzdorná ocel, $\lambda = 1,1$ W/m/K – šamot

Součinitel chladnutí

V případě komínu, kdy máme více vrstev, musíme upravit $1/\Lambda$.

Předpokládejme, že máme tři vrstvy:

- vnitřní šamotový tah s průřezem $x_s \times y_s$ [cm] a tloušťkou stěny d_{sts} s λ_s
- izolace o tloušťce d_{sti} s λ_i
- vnější obezdění s vnějšími rozměry $x_v \times y_v$ [cm] a λ_v

Máme tak čtyři průřezy:

- $x_s \times y_s$
- $x_s + 2d_{sts} \times y_s + 2d_{sts}$
- $x_s + 2d_{sts} + 2d_{sti} \times y_s + 2d_{sts} + 2d_{sti}$
- $x_v \times y_v$

Pro každý průřez spočítáme

$$D = 0,02 \frac{x \cdot y}{x + y}$$

pokud máme kruhový průřez, tak $D = d/100$

Součinitel chladnutí

Pak pro jednotlivé D_1 , D_2 , D_3 , D_4 a příslušné λ_1 , λ_2 , λ_3 spočítáme

$$\frac{1}{\Lambda} = y \frac{D_1}{2} \left[\frac{\ln \left(\frac{D_2}{D_1} \right)}{\lambda_1} + \frac{\ln \left(\frac{D_3}{D_2} \right)}{\lambda_2} + \frac{\ln \left(\frac{D_4}{D_3} \right)}{\lambda_3} \right]$$

- $y = 1$ pro kulatý vnitřní (s D_1) otvor, $y = 1,27$ pro čtvercový, $y = 1,3$ pro obdélníkový

Součinitel chlazení

Součinitel prostupu tepla k pro spojovací prvek o průměru d s tloušťkou stěny d_{st} určíme

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\lambda} + \frac{d}{(d+2 \cdot d_{st})8}}$$

Pro komín, který je složen z více částí s vnitřní D_1 a vnější D_4 , vypočteme

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\lambda} + \frac{D_1}{D_4 \cdot 8}}$$

V případě, že by byl komín veden vně budovy, upravíme vztah pro komín

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\lambda} + \frac{D_1}{D_4 \cdot 23}}$$

Součinitel chladnutí

A konečně určíme součinitel chladnutí Φ pomocí vztahu

$$\Phi = \frac{o \cdot l \cdot k}{c_p} 27,3 \cdot m_{\max}$$

- o je obvod prvku, pro kruhový prvek s průměrem $d[\text{cm}]$ $o = 3,14 \cdot d$,
pro obdélníkový průřez $x \times y$ $o = 2 \cdot (x + y)$
- l je délka prvku [cm]
- c_p je měrná tepelná kapacita, kterou jsme si již spočetli
- m_{\max} je maximální množství paliva

Spojovací prvek

Spojovací prvek má kruhový průřez a může být z jiného materiálu než šamot, je proto nutné upravit výpočet koeficientu tření λ_{sp} pro trubku o průměru R_{sp}

$$\lambda_{sp} = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \log \frac{R_{sp}}{100 \cdot k_f}\right)^2}$$

přičemž

- $k_f = 0,001$ svařované roury
- $k_f = 0,002$ plechové kanály falcované
- $k_f = 0,002$ šamotové roury
- $k_f = 0,003$ betonové kanály
- $k_f = 0,003$ broušené zděné kanály
- $k_f = 0,005$ až $0,01$ hrubé zděné kanály

Spojovací prvek

Z teploty na vstupu spojovacího prvku t_k a součinitele chladnutí Ψ určíme teplotu na jeho konci

$$t_{\text{end}} = t_k \exp(-\Phi)$$

a teplotu pro výpočet tlaků ve spojovacím prvku

$$t_{\text{sp}} = \frac{t_k + t_{\text{end}}}{2}$$

(V našem případě $t_k = 233^\circ\text{C}$, $t_{\text{end}} = 224^\circ\text{C}$, $t_{\text{sp}} = 229^\circ\text{C}$)

Pro spojovací prvek musíme poupravit vzhah pro výpočet tlaku vyvolaného třením o stěnu

$$p_{\text{rsp}} = \frac{\lambda_{\text{sp}} \cdot \rho_{\text{dsp}} \cdot d_{\text{sp}}}{R_{\text{sp}}}$$

- R_{sp} je průměr trubky [cm]
- d_{sp} je délka spojovacího prvku [cm]

Zbytek počítáme stejně jako u tahu topného systému

Komín

Pro určení teploty v komíně t_{kom} spočítáme součinitel chladnutí Φ_{kom} a z něj určíme

$$t_{\text{kom}} = \frac{t_{\text{end}} \cdot (1 - \exp(-\Phi_{\text{kom}}))}{\Phi_{\text{kom}}}$$

Pro výpočet součinitele chladnutí Φ_{kom} vycházíme z teploty na konci spojovacího prvku t_{end}

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín

Ukážeme si výpočet teploty v komínu sendvičového typu:

- vnitřní složka $x_1 = 14 \text{ cm}$, $y_1 = 14 \text{ cm}$, $d_{\text{st}} = 2,5 \text{ cm}$, $\lambda_1 = 1,1$
- izolace $d_{\text{st}} = 2,5 \text{ cm}$, $\lambda_2 = 0,8$
- vnější plášť $x = 40 \text{ cm}$, $y = 40 \text{ cm}$, $\lambda_3 = 1,08$

délka komínu $l = 600 \text{ cm}$, teplota na vstupu do komínu $t_k = 224^\circ\text{C}$,
 $m_{\text{max}} = 11,2 \text{ kg}$, $h_{\text{kam}} = 600 \text{ mm}$

$$\nu = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} t_k - 20 \cdot 10^{-12} t_k^2$$

$$\nu = 15 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-9} \cdot 224 - 20 \cdot 10^{-12} \cdot 224^2 = 2,45 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{\text{sp}} = 0,00273 \cdot m_{\text{max}} \frac{273 + t_d}{273} \frac{1}{\exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right)} \cdot \frac{10000}{S}$$

$$S = x \times y$$

$$v_{\text{sp}} = 0,00273 \cdot 11,2 \frac{273 + 224}{273} \frac{1}{\exp\left(\frac{-9,81 \cdot 600}{78624}\right)} \cdot \frac{10000}{14 \times 14} = 3,1 \text{ m/s}$$

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín

$$t_k = 224^\circ\text{C}, m_{\text{max}} = 11,2 \text{ kg}, h_{\text{kam}} = 600 \text{ mm}, \nu = 2,45 \cdot 10^{-5}, \\ v_{\text{sp}} = 3,1 \text{ m/s}, x_1 = 14 \text{ cm}, y_1 = 14 \text{ cm}$$

$$\rho_{\text{sp}} = \exp\left(\frac{-9,81 \cdot h_{\text{kam}}}{78624}\right) \cdot \left(1,293 - \frac{349,986}{273 + t_k}\right)$$

$$\rho_{\text{sp}} = \exp\left(\frac{-9,81 \cdot 600}{78624}\right) \cdot \left(1,293 - \frac{349,986}{273 + 224}\right) = 0,546 \text{ kg/m}^3$$

$$Re = \frac{v_{\text{sp}} \cdot D \cdot \rho_{\text{sp}}}{\nu}$$

$$D = 0,02 \cdot \frac{x_1 \cdot y_1}{x_1 + y_1}$$

$$Re = \frac{3,1 \cdot 0,02 \cdot \frac{14 \cdot 14}{14 + 14} \cdot 0,546}{2,45 \cdot 10^{-5}} = 9523$$

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín

$$t_k = 224^\circ\text{C}, \nu = 2,45 \cdot 10^{-5}$$

$$c_p = \frac{1011 + 0,05t_k + 0,0003t_k^2 + (15,4 + 0,016t_k - 0,000011t_k^2) \cdot 20,5}{1 + 0,0111 \cdot 20,5}$$

$$c_p = \frac{1011 + 0,05 \cdot 224 + 0,0003 \cdot 224^2 + (15,4 + 0,016 \cdot 224 - 0,000011 \cdot 224^2)}{1 + 0,0111 \cdot 20,5}$$

$$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065t_k$$

$$\lambda_A = 0,0223 + 0,000065 \cdot 224 = 0,037$$

$$Pr = \frac{\nu c_p}{\lambda_A}$$

$$Pr = \frac{\nu = 2,45 \cdot 10^{-5} \cdot 1153}{0,037} = 0,767$$

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín

Pro šamotový tah zvolíme $\Phi = 1,26$

$Re = 9523$, $Pr = 0,767$, $l = 600$ cm, λ_a

$$Nu = \Psi \cdot 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{l} \right) \right]$$

$$D = 0,02 \cdot \frac{x_1 \cdot y_1}{x_1 + y_1}$$

$$Nu = 1,26 \cdot 0,0214 \cdot (9523^{0,8} - 100) \cdot 0,767^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{0,02 \cdot \frac{14 \cdot 14}{14+14}}{600} \right) \right] = 35$$

$$\alpha = \frac{\lambda_a Nu}{D}$$

$$\alpha = \frac{0,037 \cdot 35}{0,02 \cdot \frac{14 \cdot 14}{14+14}} = 9,0969$$

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín



$$D = 0,02 \cdot \frac{x_1 \cdot y_1}{x_1 + y_1}$$

- vnitřní složka $x_1 = 14 \text{ cm}$, $y_1 = 14 \text{ cm}$

$$D_1 = 0,02 \cdot \frac{14 \cdot 14}{14 + 14} = 0,14 \text{ m}$$

- vnější plášť vnitřní složky $d_{st} = 2,5 \text{ cm} \rightarrow x_s + 2d_{sts} \times y_s + 2d_{sts}$

$$D_2 = 0,02 \cdot \frac{(14 + 2,5) \cdot (14 + 2,5)}{14 + 14 + 4 \cdot 2,5} = 0,19 \text{ m}$$

- izolace $d_{sti} = 2 \text{ cm} \rightarrow x_s + 2d_{sts} + 2d_{sti} \times y_s + 2d_{sts} + 2d_{sti}$

$$D_3 = 0,02 \cdot \frac{(14 + 2,5 + 2) \cdot (14 + 2,5 + 2)}{14 + 14 + 4 \cdot 2,5 + 4 \cdot 2} = 0,25 \text{ m}$$

- vnější plášť $x_4 = 40 \text{ cm}$, $y_4 = 40 \text{ cm}$

$$D_4 = 0,02 \cdot \frac{40 \cdot 40}{40 + 40}$$

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín

$$\lambda_1 = 1,1, \lambda_2 = 0,8, \lambda_3 = 1,08, D_1 = 0,14 \text{ m}, D_2 = 0,19 \text{ m}, D_3 = 0,25 \text{ m}, \\ D_4 = 0,40 \text{ m}, y = 1,27, \alpha = 9,0969$$

$$\frac{1}{\Lambda} = y \frac{D_1}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{\lambda_1} + \frac{\ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)}{\lambda_2} + \frac{\ln\left(\frac{D_4}{D_3}\right)}{\lambda_3} \right]$$

$$\frac{1}{\Lambda} = 1,27 \frac{0,14}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{0,19}{0,14}\right)}{1,1} + \frac{\ln\left(\frac{0,25}{0,19}\right)}{0,8} + \frac{\ln\left(\frac{0,40}{0,25}\right)}{1,08} \right] = 0,0364229$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{D_1}{D_4 \cdot 8}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{9,0969} + 0,0364229 + \frac{0,14}{0,40 \cdot 8}} = 1,931$$

Příklad výpočtu součinitele chladnutí pro komín

$$x_4 = 40 \text{ cm}, y_4 = 40 \text{ cm}, l = 600 \text{ cm}, k = 1,931 \quad c_p = 1153,$$

$$m_{\max} = 11,2 \text{ kg}, t_k = 224^\circ\text{C} \quad o = 2 \cdot (x_4 + y_4)$$

$$\Phi = \frac{o \cdot l \cdot k}{c_p} 27,3 \cdot m_{\max}$$

$$o = 2 \cdot (x_4 + y_4)$$

$$\Phi = \frac{2(40 + 40) \cdot 600 \cdot 1,931}{1153} 27,3 \cdot 11,2 = 0,53$$

$$t_{\text{kom}} = \frac{t_k \cdot (1 - \exp(-\Phi_{\text{kom}}))}{\Phi_{\text{kom}}}$$

$$t_{\text{kom}} = \frac{224 \cdot (1 - \exp(-0,53))}{0,53} = 174^\circ\text{C}$$

- 1 Trocha fyziky
- 2 Výpočet parametrů kamen
- 3 Výpočet parametrů tahového systému
- 4 Výpočet parametrů pro komín a jeho napojení
- 5 **Zhodnocení výpočtu**

Zhodnocení výpočtu

Sečteme velikost všech tlaků

$$P_h = p_{h1} + p_{h2} + p_{h3} + \dots$$

$$P_r = p_{r1} + p_{r2} + p_{r3} + \dots$$

$$P_u = p_{u1} + p_{u2} + p_{u3} + \dots$$

A pro skutečný tlakový rozdíl

$$\Delta P = P_h - P_r - P_u$$

musí platit, že je kladný a menší než maximální tlakový rozdíl

$$\Delta P_{\max} = 0,05 \cdot (P_r + P_u)$$

Pokud $\Delta P_{\max} < \Delta P$, či je ΔP záporné, pak musíme upravit náš tah.