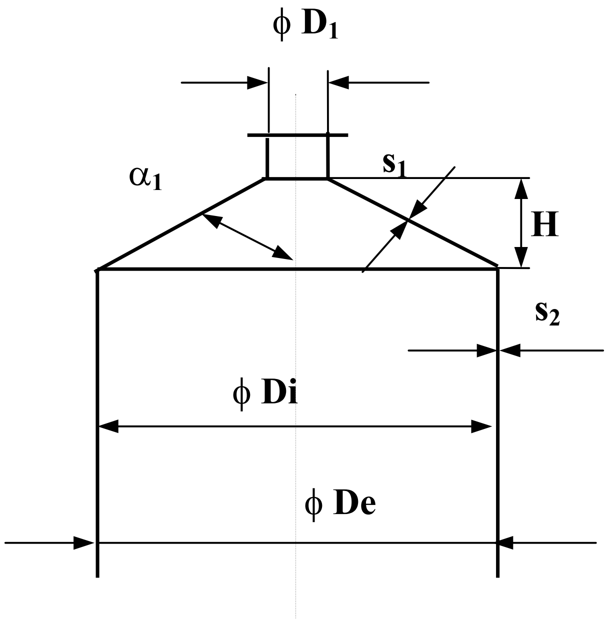
Příklad ZSPZ

Výpočet kuželového víka nádoby zatížené vnějším přetlakem

(podle ČSN 690010, část 4.6)



Náčrt válcové nádoby a kuželového víka s hrdlem

(1 – kužel; 2 – válec)

Zadané hodnoty:

Vnější průměr válcové části	$D_e = 1500$ mm
Provedená tloušťka stěny válc. části	$s_2 = 7$ mm
Vnitřní průměr válcové části	$D_i = D = 1486$ mm
Výpočtový vnější přetlak	$p_e = 100$ kPa
Dovolené napětí materiálu pláště	$[\sigma]_1 = \sigma_{D1} = 140$ MPa
Dovolené napětí materiálu kužele	$[\sigma]_2 = \sigma_{D2} = 140$ MPa
Modul pružnosti materiálu pláště i kužele	$E = 206$ GPa
Poissonova konstanta mater. pláště i kužele	$\mu = 0{,}3$
Součet přídavků na korozi atp.	$c_1 = c_2 = 1$ mm
Hrdlo TR ϕ 159x4,5	$d_1 = 150$ mm
Výška kuželového víka (pro $\alpha_1 = 70°$)	$H \approx 240$ mm

Pozn.: Níže uvedené výpočty platí pro úhel $\alpha_1 \leq 70$ °.

1. Poloviční vrcholový úhel kužele $\alpha_1 = 45$ °.

Předběžné určení tloušťky stěny s_1

Tloušťka stěny se určí předběžně podle vztahů pro válec (část 4.5) násobenými hodnotou $1/\cos\alpha_1$.

V příkladu výpočtu válcové nádoby jsme určili ze vztahu (viz dříve)

$$s_{R2} = Max\left\{K_2 * D * 10^{-2}; \frac{1{,}1 * p * D}{2 * \sigma_D}\right\} = 5{,}25mm$$

Potom bude předběžná tloušťka kuželové části

$$s_{R1} = \frac{s_{R2}}{\cos\alpha_1} = \frac{5{,}25}{\cos 45} = 7{,}4mm$$

a) Předběžná provedená tloušťka stěny s přídavky na korozi atp. bude

$\mathbf{s_1} = s_{R1} + c = 7{,}4 + 1 \approx$ **8,5 mm**

Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny bez anuloidového přechodu (používaný v dalších výpočtech)

$D_K = D - 1{,}4 * a_1 * \sin\alpha_1$

kde

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1} * (s_1 - c)}$$

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{1486}{\cos 45} * (8{,}5 - 1)} = 87{,}9mm$$

$D_K = 1486 - 1{,}4 * 87{,}9 * \sin 45 = 1399{,}0$ mm

Kontrola předběžně určené tloušťky stěny na vnější přetlak

Dovolený vnější přetlak

$$[p] = \frac{[p]_P}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_P}{[p]_E}\right)^2}}$$

Dovolený vnější přetlak v plastickém oboru

$$[p]_P = \frac{2*\sigma_D*(s_1-c)}{\frac{D_K}{\cos\alpha_1}+(s_1-c)} = \frac{2*140*(8,5-1)}{\frac{1399}{\cos 45}+(8,5-1)} = 1,06MPa$$

Dovolený vnější přetlak v elastickém oboru

$$[p]_E = \frac{20,8*10^{-6}*E}{n_U*B_1}*\frac{D_E}{l_E}*\left[\frac{100*(s_1-c)}{D_E}\right]^2*\sqrt{\frac{100*(s_1-c)}{D_E}}$$

$n_U = 2,4$ ... souč. bezpečnosti proti ztrátě stability (viz válec)

kde efektivní rozměry kuželové skořepiny jsou

$$l_E = \frac{D-d_1}{2*\sin\alpha_1} = \frac{1486-150}{2*\sin 45} = 944,7mm$$

$$D_E = Max\{D_{E1};D_{E2}\}$$

$$D_{E1} = \frac{D+d_1}{n_U*\cos\alpha_1} = \frac{1486+150}{2,4*\cos 45} = 1156,8mm$$

$$D_{E2} = \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0,31*(D+d_1)*\sqrt{\frac{D+d_1}{s_1-c}}*tg\alpha_1$$

$$D_{E2} = \frac{1486}{\cos 45} - 0{,}31*(1485+150)*\sqrt{\frac{1486+150}{8{,}5-1}}*tg45 = -6439{,}7mm$$

D_E = 1156,8 mm

$$B_1 = Min\left\{B_{11} = 1{,}0; B_{12} = 9{,}45*\frac{D_E}{l_E}*\sqrt{\frac{D_E}{100*(s_1-c)}}\right\}$$

$$B_{12} = 9{,}45*\frac{1156{,}8}{944{,}7}*\sqrt{\frac{1156{,}8}{100*(8{,}5-1)}} = 14{,}4$$

B_1 = 1,0

$$\left[p\right]_E = \frac{20{,}8*10^{-6}*206*10^3}{2{,}4*1{,}0}*\frac{1156{,}8}{944{,}7}*\left[\frac{100*(8{,}5-1)}{1156{,}8}\right]^2*\sqrt{\frac{100*(8{,}5-1)}{1156{,}8}}$$

$$\left[p\right]_E = 0{,}740MPa$$

Potom je maximální povolený vnější přetlak pro tloušťku stěny kužele s_1 = 8,5 mm

$$\left[p\right] = \frac{1{,}06}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}06}{0{,}740}\right)^2}} = 0{,}607MPa \geq 0{,}100MPa$$

Kuželová skořepina je podle předběžně určené tloušťky stěny s_1 značně předimenzovaná. Proto budeme výpočet opakovat pro nově odhadnutou tloušťku stěny kužele.

b) Nová volba předběžně provedené tloušťky stěny s přídavky na korozi atp. bude

$\mathbf{s_1} = s_{R1} + c = 4 + 1 \approx \mathbf{5\ mm}$

Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny bez anuloidového přechodu (používaný v dalších výpočtech)

$D_K = D - 1{,}4 * a_1 * \sin\alpha_1$

kde

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1} * (s_1 - c)}$$

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{1486}{\cos 45} * (5 - 1)} = 64{,}1mm$$

$D_K = 1486 - 1{,}4 * 64{,}1 * \sin 45 = 1422{,}5$ mm

Kontrola předběžně určené tloušťky stěny na vnější přetlak

Dovolený vnější přetlak

$$[p] = \frac{[p]_P}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_P}{[p]_E}\right)^2}}$$

Dovolený vnější přetlak v plastickém oboru

$$[p]_P = \frac{2*\sigma_D*(s_1-c)}{\frac{D_K}{\cos\alpha_1}+(s_1-c)} = \frac{2*140*(5-1)}{\frac{1422{,}5}{\cos 45}+(5-1)} = 0{,}556MPa$$

Dovolený vnější přetlak v elastickém oboru

$$[p]_E = \frac{20{,}8*10^{-6}*E}{n_U*B_1}*\frac{D_E}{l_E}*\left[\frac{100*(s_1-c)}{D_E}\right]^2*\sqrt{\frac{100*(s_1-c)}{D_E}}$$

kde efektivní rozměry kuželové skořepiny jsou

$$l_E = \frac{D-d_1}{2*\sin\alpha_1} = \frac{1486-150}{2*\sin 45} = 944{,}7mm$$

$$D_E = Max\{D_{E1};D_{E2}\}$$

$$D_{E1} = \frac{D+d_1}{n_U*\cos\alpha_1} = \frac{1486+150}{2{,}4*\cos 45} = 1156{,}8mm$$

$$D_{E2} = \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0{,}31*(D+d_1)*\sqrt{\frac{D+d_1}{s_1-c}}*tg\alpha_1$$

$$D_{E2} = \frac{1486}{\cos 45} - 0{,}31*(1486+150)*\sqrt{\frac{1486+150}{5-1}}*tg45 = -9205{,}9mm$$

D_E = 1156,8 mm

$$B_1 = Min\left\{B_{11} = 1{,}0; B_{12} = 9{,}45*\frac{D_E}{l_E}*\sqrt{\frac{D_E}{100*(s_1-c)}}\right\}$$

$$B_{12} = 9{,}45*\frac{1156{,}8}{944{,}7}*\sqrt{\frac{1156{,}8}{100*(5-1)}} = 19{,}7$$

$B_1 = 1,0$

$$\left[p\right]_E = \frac{20,8*10^{-6}*206*10^3}{2,4*1,0}*\frac{1156,8}{944,7}*\left[\frac{100*(5-1)}{1156,8}\right]^2*\sqrt{\frac{100*(5-1)}{1156,8}}$$

$$\left[p\right]_E = 0,154MPa$$

Potom je maximální povolený vnější přetlak pro tloušťku stěny kužele s_1 = 5 mm

$$\left[p\right] = \frac{0,556}{\sqrt{1+\left(\frac{0,556}{0,154}\right)^2}} = 0,148MPa \geq 0,100MPa$$

Pozn.: Pro s_1 = 4,5 mm vychází [p] = 0,107 MPa = 107 kPa. Tato hodnota prakticky odpovídá výpočtovému vnějšímu přetlaku.

2. Poloviční vrcholový úhel kužele α_1 = 70 °.

Předběžné určení tloušťky stěny s_1

Tloušťka stěny se určí předběžně podle vztahů pro válec (část 4.5) násobený-mi hodnotou $1/\cos\alpha_1$.

V příkladu výpočtu válcové nádoby jsme určili ze vztahu (viz dříve)

$$s_{R2} = Max\left\{K_2 * D * 10^{-2}; \frac{1,1*p*D}{2*\sigma_D}\right\} = 5,25mm$$

Potom bude předběžná tloušťka kuželové části

$$s_{R1} = \frac{s_{R2}}{\cos\alpha_1} = \frac{5{,}25}{\cos 70} = 15{,}3mm$$

a) Předběžná provedená tloušťka stěny s přídavky na korozi atp. bude

$\mathbf{s_1} = s_{R1} + c = 15{,}3 + 1 \approx 1\mathbf{5}$ **mm**

(odhadneme nižší hodnotu na základě poznatků z první části výpočtu pro úhel kužele $\alpha_1 = 45$ °), t.zn. že tento odhad je předimenzován.

Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny bez anuloidového přechodu (používaný v dalších výpočtech) – výpočet je stejný jako v předchozím.

$D_K = D - 1{,}4 * a_1 * \sin\alpha_1$

kde

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1} * (s_1 - c)}$$

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{1486}{\cos 70} * (15 - 1)} = 172{,}6mm$$

$D_K = 1486 - 1{,}4 * 172{,}6 * \sin 70 = 1259{,}0$ mm

Kontrola předběžně určené tloušťky stěny na vnější přetlak

Dovolený vnější přetlak

$$[p] = \frac{[p]_P}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_P}{[p]_E}\right)^2}}$$

Dovolený vnější přetlak v plastickém oboru

$$[p]_P = \frac{2*\sigma_D*(s_1-c)}{\frac{D_K}{\cos\alpha_1}+(s_1-c)} = \frac{2*140*(15-1)}{\frac{1259}{\cos 70}+(15-1)} = 1{,}061MPa$$

Dovolený vnější přetlak v elastickém oboru

$$[p]_E = \frac{20{,}8*10^{-6}*E}{n_U*B_1}*\frac{D_E}{l_E}*\left[\frac{100*(s_1-c)}{D_E}\right]^2*\sqrt{\frac{100*(s_1-c)}{D_E}}$$

kde efektivní rozměry kuželové skořepiny jsou

$$l_E = \frac{D-d_1}{2*\sin\alpha_1} = \frac{1486-150}{2*\sin 70} = 710{,}9mm$$

$$D_{E1} = \frac{D+d_1}{n_U*\cos\alpha_1} = \frac{1486+150}{2{,}4*\cos 70} = 2392mm$$

$$D_E = Max\{D_{E1};D_{E2}\}$$

$$D_{E2} = \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0{,}31*(D+d_1)*\sqrt{\frac{D+d_1}{s_1-c}}*tg\alpha_1$$

$$D_{E2} = \frac{1486}{\cos 70} - 0{,}31*(1486+150)*\sqrt{\frac{1486+150}{15-1}}*tg70 = -12890mm$$

D_E = 2392 mm

$$B_1 = Min\left\{ B_{11} = 1,0; B_{12} = 9,45 * \frac{D_E}{l_E} * \sqrt{\frac{D_E}{100*(s_1 - c)}} \right\}$$

$$B_{12} = 9,45 * \frac{2392}{710,9} * \sqrt{\frac{2392}{100 * (15-1)}} = 41,56$$

$B_1 = 1,0$

$$[p]_E = \frac{20,8 * 10^{-6} * 206 * 10^3}{2,4 * 1,0} * \frac{2392}{710,9} * \left[\frac{100 * (15-1)}{2392}\right]^2 * \sqrt{\frac{100 * (15-1)}{2392}}$$

$$[p]_E = 1,574 MPa$$

Potom je maximální povolený vnější přetlak pro tloušťku stěny kužele s_1 = 15 mm

$$[p] = \frac{1,061}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,061}{1,574}\right)^2}} = 0,880 MPa \geq 0,100 MPa$$

Kuželová skořepina je podle předběžně určené tloušťky stěny s_1 značně předimenzovaná. Proto budeme výpočet opakovat pro nově odhadnutou tloušťku stěny kužele.

b) Nová volba předběžně provedené tloušťky stěny s přídavky na korozi atp. bude

$s_1 = s_{R1} + c = 5 + 1 \approx$ **6 mm**

Výpočtový průměr hladké kuželové skořepiny bez anuloidového přechodu (používaný v dalších výpočtech)

$D_K = D - 1,4 * a_1 * \sin\alpha_1$

kde

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1} * (s_1 - c)}$$

$$a_1 = 0{,}7 * \sqrt{\frac{1486}{\cos 70} * (6 - 1)} = 103{,}2mm$$

D_K = 1486 – 1,4 * 103,2 * sin70 = 1350 mm

Kontrola předběžně určené tloušťky stěny na vnější přetlak

Dovolený vnější přetlak

$$[p] = \frac{[p]_P}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_P}{[p]_E}\right)^2}}$$

Dovolený vnější přetlak v plastickém oboru

$$[p]_P = \frac{2 * \sigma_D * (s_1 - c)}{\frac{D_K}{\cos\alpha_1} + (s_1 - c)} = \frac{2 * 140 * (6 - 1)}{\frac{1350}{\cos 70} + (6 - 1)} = 0{,}354MPa$$

Dovolený vnější přetlak v elastickém oboru

$$[p]_E = \frac{20{,}8 * 10^{-6} * E}{n_U * B_1} * \frac{D_E}{l_E} * \left[\frac{100 * (s_1 - c)}{D_E}\right]^2 * \sqrt{\frac{100 * (s_1 - c)}{D_E}}$$

kde efektivní rozměry kuželové skořepiny jsou

$$l_E = \frac{D - d_1}{2 * \sin\alpha_1} = \frac{1486 - 150}{2 * \sin 70} = 710{,}9mm$$

$$D_E = Max\{D_{E1}; D_{E2}\}$$

$$D_{E1} = \frac{D + d_1}{n_U * \cos\alpha_1} = \frac{1486 + 150}{2{,}4 * \cos 70} = 2392mm$$

$$D_{E2} = \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0{,}31 * (D + d_1) * \sqrt{\frac{D + d_1}{s_1 - c}} * tg\alpha_1$$

$$D_{E2} = \frac{1486}{\cos 70} - 0{,}31 * (1486 + 150) * \sqrt{\frac{1486 + 150}{6 - 1}} * tg70 = -23033mm$$

D_E = 2392 mm

$$B_1 = Min\left\{B_{11} = 1{,}0; B_{12} = 9{,}45 * \frac{D_E}{l_E} * \sqrt{\frac{D_E}{100 * (s_1 - c)}}\right\}$$

$$B_{12} = 9{,}45 * \frac{2392}{710{,}9} * \sqrt{\frac{2392}{100 * (6 - 1)}} = 69{,}5$$

B_1 = 1,0

$$[p]_E = \frac{20{,}8 * 10^{-6} * 206 * 10^3}{2{,}4 * 1{,}0} * \frac{2392}{710{,}9} * \left[\frac{100 * (6 - 1)}{2392}\right]^2 * \sqrt{\frac{100 * (6 - 1)}{2392}}$$

$$[p]_E = 0{,}120MPa$$

Potom je maximální povolený vnější přetlak pro tloušťku stěny kužele s_1 = 6 mm

$$\left[p\right] = \frac{0{,}354}{\sqrt{1+\left(\dfrac{0{,}354}{0{,}120}\right)^2}} = 0{,}114\,MPa \geq 0{,}100\,MPa$$

Pozn. 1:

Pro s_1 = 5,5 mm vychází [p] = 0,089 MPa = 89 kPa. Tato hodnota je nižší než výpočtový vnější přetlak. Tomuto vnějšímu přetlaku (podtlaku v PKZ) by odpovídala teplota kondenzující brýdové páry (na mezní křivce – absolutní tlak cca 11 kPa) – cca 48 °C. Pro provozní teploty kondenzující syté brýdy cca 55 až 65 °C resp. tlaky cca 15 až 25 kPa (vnější přetlak cca 75 až 85 kPa) by tato tloušťka vyhovovala.

Zákazník ze SRN i pro tyto parametry požadoval provést výpočet na vnější přetlak 100 kPa, t.zn. absolutní vakuum (absolutní tlak 0 kPa). Kužel bylo nutno vyztužit radiálními žebry.

Pozn. 2:

Nová norma ČSN 690010 bere jako výpočtový průměr nádoby vnitřní průměr. Stará norma ČSN 690010 bere jako výpočtový vnější průměr nádoby.

Výpočet kuželového dna $\alpha_1 = 70$ ° podle staré ČSN 690010

Výpočet tloušťky kuželové stěny při vnějším přetlaku

Pevnostní hledisko

a)
Pro ostrý přechod z kužele do válcové části platí parametr r / D = 0,01.

Z diagramu 6 určíme pro r / D = 0,01 a $\alpha_1 = 70$ ° hodnotu $\beta = 10$.

Tloušťka kuželové stěny na průměru $D_K = D = 1500$ mm je

$$s_0 = \frac{D_K * p * \beta * 1,25}{4 * \sigma_D} + 1 = \frac{1500 * 0,100 * 10 * 1,25}{4 * 140} + 1 = 4,35 mm$$

$s = s_0 + c = 4,35 + 1 = 5,35$ mm

Provedená tloušťka stěny s = 7 mm vyhovuje.

b)
Tloušťka kuželové stěny na průměru $D_K = D = 1500$ mm je

$$s_0 = \frac{D_K * p}{2 * \sigma_D * v + p} * \frac{1}{\cos\alpha_1} = \frac{1500 * 0,100}{2 * 140 * 0,7 + 0,100} * \frac{1}{\cos 70} = 2,24 mm$$

kde v = 0,7 ... souč. hodnoty svaru

Provedená tloušťka stěny s = 7 mm vyhovuje.

Hledisko stabilitní

Kužel se počítá jako válec o následujících rozměrech (průměr D a délka L):

$D = D_S / \cos\alpha_1 = 1500 / \cos 70 = 4386$ mm

kde $D_S = 1500$ ... střední průměr mezi dvěma sousedními výztuhami
(výztuhy nejsou navrženy).

L = 1,25 * H = 1,25 * 240 = 300 mm

a)

Pro L / D = 300 / 4386 = 0,068 a σ_D / p = 140 / 0,100 = 1400 určíme z diagramu β = 1,3. Potom je výpočtová tloušťka stěny kužele

$$s_0 = \frac{D * p * \beta}{2 * \sigma_D + p} = \frac{4386 * 0{,}100 * 1{,}3}{2 * 140 + 0{,}100} = 2{,}04 mm$$

Provedená tloušťka stěny s = 7 mm vyhovuje.

b)

Určíme parametry A a L / D a pro ně z diagramu 2 určíme poměr s_0 / D.

$$A = \frac{p * 10^6}{E} = \frac{0{,}100 * 10^6}{206 * 10^3} = 0{,}485$$

L / D = 300 / 4386 = 0,068

s_0 / D = 0,001

s_0 = 0,001 * D = 0,001 * 4386 = 4,4 mm

s = s_0 + c = 4,4 + 1 = 5,4 mm

Provedená tloušťka stěny s = 7 mm vyhovuje.