

Podstawy obliczeń inżynierskich 2 – projekt

Ćwiczenie 2 – Instrukcja projektowania zbiornika ciśnieniowego

1. Projektowanie zbiorników ciśnieniowych według Warunków Urząd Dozoru Technicznego (WUDT-UC)

Istnieje szereg urządzeń, które ze względu na potencjalne niebezpieczeństwo związane z ich eksploatacją podlegają dozorowi technicznemu, za który odpowiedzialny jest w Polsce Urząd Dozoru Technicznego (UDT). Urządzenia te obejmują m.in. urządzenia ciśnieniowe, zbiorniki przeznaczone do magazynowania materiałów trujących lub żrących lub materiałów ciekłych zapalnych, urządzenia transportu bliskiego, dźwigniki oraz przenośniki kabinowe i krzeselkowe. Dozór techniczny obejmuje projektowanie, wykonanie, eksploatację i modernizację tych urządzeń. **Zbiornik ciśnieniowy podlega dozorowi technicznemu, jeśli iloczyn jego objętości i nadciśnienia przekracza 300 bar dm³ oraz nadciśnienie przekracza wartość 0,5 bar (z pewnymi wyjątkami).** UDT opublikował Warunki Urzędu Dozoru technicznego dla urządzeń ciśnieniowych (WUDT-UC), które zawierają wytyczne do projektowania urządzeń ciśnieniowych. Należy pamiętać, że WUDT-UC są nieobowiązkową specyfikacją techniczną i nie mają mocy przepisów prawnych. Stanowią jednakże sprawdzoną instrukcję do projektowania zbiorników ciśnieniowych, która gwarantuje spełnienie wszystkich wymogów konstrukcyjnych stawianych przez UDT.

2. Obliczenia projektowe dla części cylindrycznej zbiornika zgodnie z WUDT-UC

Celem pierwszego etapu obliczeń jest określenie grubości części cylindrycznej zbiornika. Na początku należy określić współczynnik α zależny od geometrii projektowanego zbiornika według poniższej tabeli:

Tabela 2.1

β [-]	≤ 1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
α [-]	1.000	1.025	1.050	1.075	1.100	1.125	1.150

$$\beta = \frac{D_z}{(D_z - 2g_n)} \quad (2.1)$$

gdzie:

 β – stosunek średnicy zewnętrznej do wewnętrznej, D_z – średnica zewnętrzna zbiornika, g_n – grubość ścianki zbiornika.

Ponieważ na początku obliczeń nie znamy grubości zbiornika, to musimy z góry założyć pewien zakres wartości współczynnika β . Dla zbiorników cienkościennych słuszne jest założenie $\beta \leq 1.4$ (a zatem $\alpha = 1.000$). To założenie należy oczywiście zweryfikować na końcu obliczeń wytrzymałościowych.

Grubość ścianki dla elementów walcowych dla których $\beta \leq 2$ wyznacza się z jednego z następujących wzorów:

$$g_0 = \frac{p_0 D_z}{\frac{2,3}{\alpha} k z + p_0} \quad (2.2)$$

$$g_0 = \frac{p_0 D_w}{\frac{2,3}{\alpha} k z - p_0} \quad (2.3)$$

gdzie:

 p_0 – ciśnienie obliczeniowe, k – naprężenie dopuszczalne w temperaturze obliczeniowej, z – współczynnik wytrzymałościowy, α – współczynnik zależny od β .

Wartość ciśnienia obliczeniowego przyjmuje się jako największą wartość nadciśnienia czynnika roboczego jaka może wystąpić w urządzeniu, bez uwzględnienia chwilowego wzrostu ciśnienia spowodowanego działaniem urządzeń zabezpieczających. Należy też uwzględnić wartość nadciśnienia występującego w warunkach próby wytrzymałościowej oraz ciśnienie hydrostatyczne, jeżeli przekracza ono 5 % wartości ciśnienia obliczeniowego.

Dla temperatur obliczeniowych nie przekraczających temperatury granicznej dla danego gatunku stali wartość dopuszczalnych naprężeń k wyznacza się ze wzoru:

$$k = \frac{R_{e/t}}{x} \quad (2.4)$$

gdzie:

 $R_{e/t}$ – wyraźna granica plastyczności w temperaturze obliczeniowej, x – współczynnik bezpieczeństwa dla określenia naprężeń dopuszczalnych w temperaturze obliczeniowej.

Przy określaniu wartości naprężeń dopuszczalnych należy przyjmować następujące współczynniki bezpieczeństwa:
 $x = 1,65$ – dla stali węglowych, dla których ustalono wymagania co do udarności, dla stali stopowych i dla stalowych rur kotłowych i o 40 % większy dla staliwa;
 $x = 1,8$ – dla pozostałych stali węglowych;
 $x = 7,0$ – dla żeliwa, przy czym dla tego materiału podstawia się wartość $R_{m/t}$ (wytrzymałość materiału na rozciąganie) zamiast $R_{e/t}$;
 $x = 4,0$ – dla brązu, miedzi, wyżarzonej miedzi i wyżarzonego aluminium, przy czym dla tych materiałów podstawia się wartość $R_{m/t}$ (wytrzymałość materiału na rozciąganie) zamiast $R_{e/t}$.
 Temperaturę obliczeniową przyjmuje się według poniższej tabeli.

Tabela 2.2

LP	Rodzaj elementu	temperatura obliczeniowa elementu - t_o			
		Nieogrzewanego	zaizolowanego	ogrzewanego	
				konwekcyjnie	przez promieniowanie
1	Rury podlegające ciśnieniu wewnętrznemu zawierające wodę ciekłą lub parę nasyconą	$t_o = t_m$	$t_o = t_m + 20\text{ °C}$	$t_o = t_m + 25\text{ °C}$	$t_o = t_m + 50\text{ °C}$
2	Elementy przegrzewaczy	$t_o = t_m + 15\text{ °C}$	$t_o = t_m + 20\text{ °C}$	$t_o = t_m + 35\text{ °C}$	$t_o = t_m + 50\text{ °C}$
3	Płomienice gładkie			$t_o = t_m + 4 g_{rz} + 20\text{ °C}$	
4	Płomienice falowane			$t_o = t_m + 3 g_{rz} + 20\text{ °C}$	
5	Płomieniówki			$t_o = t_m + 50\text{ °C}$	
6	Połączenia kołnierzo-śrubowe	$t_o = t_m$			
7	Inne elementy z wyjątkiem połączeń kołnierzo-śrubowych	$t_o = t_m$	$t_o = t_m + 20\text{ °C}$	$t_o = t_m + 50\text{ °C}$	

Współczynnik wytrzymałościowy z wyznacza się następująco:

- Dla miejsc nieposiadających złączy spawanych lub zgrzewanych ani osłabionych otworami, lutowanych bądź spawanych na zakładkę pod warunkiem, że szerokość zakładki wynosi co najmniej 6 nominalnych grubości blachy: $z = 1$
- Dla miejsc posiadających złącza spawane lub zgrzewane: $z = z_b$ (obliczane zgodnie z WUDT-UC-WO-W/11 – zależnie od zakresu badań). Można przyjąć $z_b = 1$ dla pełnych badań.
- Dla miejsc osłabionych otworami: $z = \min[z_1; 2z_2; z_{red}; z_0]$ (obliczane zgodnie z WUDT-UC-WO-O/01:01)

Jeżeli to konieczne przy określaniu grubości ścianki należy ustalić naddatki na ścieranie, korozję i dodatkowe obciążenia:

$$g = g_0 + c_1 + c_2 + c_3 \quad (2.5)$$

gdzie:

c_1 – naddatek na ścieranie,

c_2 – naddatek na korozję,

c_3 – naddatek na dodatkowe obciążenia.

W celu wyznaczenia naddatku na ścieranie wymagane jest założenie szybkości ścierania materiału w warunkach pracy urządzenia. Dla płynów nie będących zawiesinami ścieranie jest pomijalne.

Przy obliczaniu naddatku na korozję należy odszukać tablicową szybkość korozji dla warunków pracy urządzenia i przemnożyć ją przez zadany czas pracy. Naddatek na dodatkowe obciążenia wyznacza się poprzez obliczenie grubości ścianki dla ciśnienia hydrostatycznego płynu.

Nominalna grubość blachy g_n przyjęta w projekcie powinna być znormalizowana i większa od obliczeniowej g .

3. Obliczenia projektowe dla dennic zbiornika zgodnie z WUDT-UC

Podobnie jak w przypadku części cylindrycznej zbiornika, również dla dennic zbiornika należy wyznaczyć grubość blachy. Poniżej przedstawiono sposób obliczeń dla dna elipsoidalnego.

Obliczeniową grubość ścianki dna w części wypukłej oblicza się następująco:

$$g_0^w = \frac{D_z p_0 y_w}{4 k} \quad (3.1)$$

Współczynnik y_w ustala się według poniższej tabeli zawierającej zależności y_w od $\frac{H_z}{D_z}$ oraz ω . Należy przyjąć największy ze współczynników wyznaczony zgodnie z opisem.

Tabela 3.1

$\frac{H_z}{D_z}$	0.18	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$\omega = 0.00$	3.37	2.90	2.00	1.53	1.30	1.18	1.12	1.10
$\omega = 0.50$	3.37	2.90	2.00	1.65	1.42	1.30	1.23	1.20
$\omega = 1.00$	3.37	2.90	2.30	2.00	1.81	1.70	1.63	1.60
$\omega = 2.00$	3.92	3.68	3.21	2.92	2.69	2.50	2.33	2.20
$\omega = 3.00$	4.87	4.61	4.10	3.77	3.52	3.32	3.15	3.00
$\omega = 4.00$	5.78	5.53	4.99	4.68	4.28	4.04	3.86	3.70
$\omega = 5.00$	6.77	6.50	5.90	5.41	5.03	4.76	4.52	4.35

Do obliczeń należy przyjmować wartości y_w zaokrąglone do dwóch znaków dziesiętnych po przecinku.

$$\omega = \frac{d}{\sqrt{D_z g_{rz}^w}} \quad (3.2)$$

gdzie:

d – średnica otworu w dennicy,

D_z – średnica dennicy,

g_{rz}^w – rzeczywista grubość ścianki dennicy,

H_z – wysokość wyoblonej części dennicy.

Można przyjąć $\omega = 0$ dla dwóch przypadków:

I. Dla den pełnych

II. Dla każdego prawidłowo wzmocnionego otworu w dnie

Grubość ścianki części walcowej dna oblicza się tak jak dla części walcowej zbiornika.

Wartości naprężeń dopuszczalnych k oblicza się przyjmując współczynniki bezpieczeństwa jak niżej.

$x = 1,4$ – dla stali węglowych, dla których obowiązujące normy ustalają wymagania do udarności i dla stali stopowych;

$x = 1,55$ – dla pozostałych stali węglowych;

$x = 3,4$ – dla brązu, mosiądzu, wyżarzonej miedzi i wyżarzonego aluminium przy czym dla tych materiałów podstawia się wartość $R_{m/t}$ (wytrzymałość materiału na rozciąganie) zamiast $R_{e/t}$.

Typoszereg rozmiarów dennicy elipsoidalnej można odczytać z Polskiej Normy nr PN 75/M-35412 lub np. Normy Branżowej BN-88/2554-01.

W celu określenia minimalnej grubości dennicy, należy – analogicznie do części walcowej zbiornika – uwzględnić odpowiednie nadatki:

$$g^w = g_0^w + c_1 + c_2 + c_3 \quad (3.3)$$

gdzie:

c_1 – nadatek na ścieranie,

c_2 – nadatek na korozję,

c_3 – nadatek na dodatkowe obciążenia.

Nominalna grubość dennicy g_n^w przyjęta w projekcie powinna być znormalizowana i większa od obliczeniowej g^w .

4. Projektowanie połączenia kołnierzowo- śrubowego

W ramach projektowania połączenia kołnierzowo-śrubowego należy dobrać kołnierz, uszczelkę oraz śruby, a także wyznaczyć naciąg śrub w połączeniu kołnierzowo-śrubowym. Odpowiedni kołnierz dla zamknięcia zbiornika należy dobrać zgodnie z normą PN-EN 1092-1 (kołnierz z szyjką do przyspawania, typ 11).

Wartość siły ruchowego naciągu śrub oblicza się według wzorów:

$$N_r = P + b S \quad (4.1)$$

$$P = \frac{\pi D_u^2}{4} p_0 \quad (4.2)$$

$$S = \pi D_u U_{cz} \sigma_r \quad (4.3)$$

gdzie:

D_u – średnia średnica uszczelki,

U_{cz} – szerokość czynna uszczelki,

σ_r – Naprężenie ściskające w uszczelce wywołane siłą S ,

b - współczynnik zapewniający wymagany naciąg śrub w przypadku pełzania uszczelki ($b = 1,6$),

Wartości D_u i U_{cz} zależą od rodzaju uszczelnienia, natomiast wartość σ_r określa się według Tabeli 4.2.

Szerokość czynną uszczelki U_{cz} wyznacza się według poniższego wzoru, w zależności od szerokości uszczelki U :

$$U_{cz} = \begin{cases} U & \text{dla } U \leq 12 \text{ mm} \\ 3,47 \cdot \sqrt{U} & \text{dla } U > 12 \text{ mm} \end{cases} \quad (4.4)$$

Wartość siły montażowego naciągu śrub przyjmuje się jako większą z obliczonych według wzorów:

$$N_{m1} = \pi D_u U_{cz} \sigma_m \quad (4.5)$$

$$N_{m2} = C N_r \quad (4.6)$$

gdzie:

D_u, U_{cz} – to wymiary uszczelki (patrz wyżej),

σ_m – to wartość naprężenia, dobrana w zależności od materiału uszczelki, zgodnie z Tabelą 4.2,

$C = 1,2$ – dla $D_u \leq 500$ mm,

$C = 1,4$ – dla $D_u > 500$ mm,

N_r – wartość siły ruchowego naciągu śrub.

Średnice rdzenia śrub powinna być co najmniej równa większej z wartości obliczonych według wzorów:

$$d_{sm} = 1,13 \sqrt{\frac{N_m}{\psi n_s k_1}} \quad (4.7)$$

$$d_{sr} = 1,13 \sqrt{\frac{N_m}{\psi n_s k_2}} \quad (4.8)$$

gdzie:

N_m – wartość siły montażowego naciągu śrub,

n_s – liczba śrub w kołnierzu,

k_1 – naprężenia dopuszczalne w temperaturze otoczenia (tak jak dla części walcowej),

k_2 – naprężenia dopuszczalne w temperaturze obliczeniowej (tak jak dla części walcowej),

ψ – współczynnik wyznaczany zgodnie z poniższą tabelą:

Tabela 4.1

Rodzaj wykonania śrub i nakrętek	Współczynnik ψ
zgrubne ¹	0.5
średnio dokładne	0.8
dokładne	1.0

¹mogą być stosowane wyłącznie dla $p_0 \leq 1,6$ [MPa] oraz $-20 < t_0 \leq +200$ °C

Na podstawie minimalnej średnicy rdzenia śrub dobiera się średnicę śrub (oraz podkładek i nakrętek) z odpowiedniego typoszeregu.

Tabela 4.2

Rodzaj uszczelki		σ_m [MPa]	σ_r [MPa]		
Uszczelki miękkie (niemetalowe)	Miękka guma z kauczuku syntetycznego o twardości według Shore'a < 75	0.1	p_0		
	Twarda guma z kauczuku naturalnego lub syntetycznego o twardości według Shore'a ≥ 75	1.4	$2.0 p_0$		
	Miękka guma z kauczuku naturalnego lub syntetycznego z przekładkami płóciennymi				
	Twarda guma z kauczuku naturalnego lub syntetycznego z przekładkami płóciennymi	2.8	$2.5 p_0$		
	Tektura techniczna impregnowana i graficzna (tiG) pokostowana	5.0	$3.0 p_0$		
	Skóra				
	Korek prasowany				
	Filc techniczny				
	Arkusze z włókna roślinnego (z konopi lub juty)	8.0	$3.5 p_0$		
	Fibra Masa azbestowo-kauczukowa	o grubości [mm]	1	40.0	$6.4 p_0$
	Tarflen (teflon)		2	21.0	$5.0 p_0$
	Płyta azbestowa prasowana		3	12.0	$4.1 p_0$
	Uszczelki metalowe	Falowany pierścień metalowy	z wyżarzonego aluminium	26.0	$5.5 p_0$
z wyżarzonej miedzi lub mosiądzu			31.5	$6.0 p_0$	
z żelaza lub miękkiej stali			38.5	$6.5 p_0$	
ze stali 4-6 % Cr			46.0	$7.0 p_0$	
ze stali nierdzewnej lub kwasoodpornej			53.5	$7.5 p_0$	
Płaski, rowkowy lub soczewkowy pierścień metalowy lub okrągły pierścień metalowy (druć)		z ołowiu	55.0	$7.5 p_0$	
		z wyżarzonego aluminium	62.0	$8.0 p_0$	
		z wyżarzonej miedzi lub mosiądzu	91.5	$9.5 p_0$	
		z żelaza lub miękkiej stali	126.5	$11.0 p_0$	
		ze stali 4-6 % Cr	153.0	$12.0 p_0$	
Uszczelki kombinowane	Wypełniona azbestem płaska koszulka metalowa	ze stali nierdzewnej lub kwasoodpornej	183.0	$13.0 p_0$	
		z wyżarzonego aluminium	38.5	$6.0 p_0$	
		z wyżarzonej miedzi lub mosiądzu	46.0	$7.0 p_0$	
		z żelaza lub miękkiej stali	53.5	$7.5 p_0$	
		z monelu	56.5	$7.0 p_0$	
	Przekładana azbestem spirala metalowa	ze stali 4-6 % Cr	63.5	$7.5 p_0$	
		ze stali węglowej	20.5	$5.0 p_0$	
	Azbestomiedź (AM)	ze stali nierdzewnej	31.5	$6.0 p_0$	
	Azbestokauczukowa z wewnętrzną metalową wkładką falowaną lub azbest owinięty metalową blachą	Azbestomiedź (AM)	26.0	$5.5 p_0$	
		z wyżarzonego aluminium	z wyżarzonego aluminium	20.5	$5.0 p_0$
z wyżarzonej miedzi lub mosiądzu			26.0	$5.5 p_0$	
z żelaza lub miękkiej stali			31.5	$6.0 p_0$	
ze stali 4-6 % Cr			38.5	$6.5 p_0$	
ze stali nierdzewnej lub kwasoodpornej	46.0	$7.0 p_0$			