

**ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ОЛЕСЯ ГОНЧАРА
Фізико-технічний факультет
Кафедра проектування та конструкцій ЛА**

В.І. Ліповський

**Методичні вказівки до розрахунків елементів
конструкцій баків ракет-носіїв**

**Дніпро
2019**

Аннотация

В методичних вказівках розглянуто приклади розрахунку елементів конструкцій бака ракети носія. Всі розрахунки виконані на базі рекомендованої літератури.

В роботі розглянуті конструктивні елементи, які визначені після проведеної декомпозиції конструкції бака. Для кожного конструктивного елементу виконано визначення товщин отриманих примітивних оболонок та аналіз, при якому обирається та конструкція (гладка чи підкріплена), яка максимально забезпечує умову працездатності та критерій мінімальної маси.

При розрахунках використовуються: гіпотези Кірхгофа-Лява, безмоментна теорія оболонок та третя теорія міцності. Проектувальні розрахунки при роботі конструкції на міцність і стійкість проводяться в трьох розрахункових випадках при польоті ЛА на активній ділянці траєкторії з урахуванням температурного впливу в процесі гарячого наддуву бака. Кожному розрахунковому прикладу задані початкові данні, які відповідають своїм умовам навантаження конструкції.

Приклад проектувального розрахунку конічного днища

Розрахунок нижнього днища бака

В даній конструкції розглянуто ввігнуте конічне днище бака, що навантажене внутрішнім тиском. Тож, даний конструкційний елемент працює на стиск в результаті дії тиску, необхідно проводити розрахунок на міцність та стійкість. Використовуємо розрахункову схему представлену на рис.1. Діаметр основи конічної оболонки дорівнює 2400 мм. Навантаження: $P_n^e = 0,32 \text{ МПа}$, $P_\gamma^e = 0,05 \text{ МПа}$. Матеріал АМГ6М. Температура 50° С .

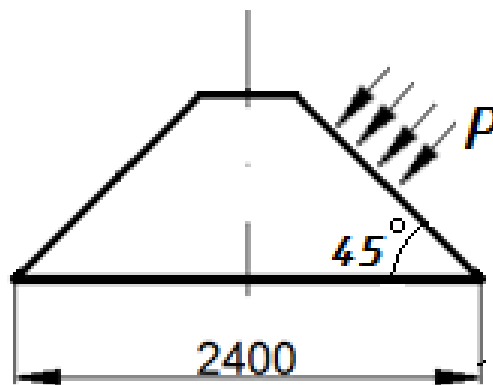


Рис.1

Розрахункова схема верхнього днища

Розрахунок на міцність

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\max}^p = (P_n^e + P_\gamma^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,05 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,705 \text{ МПа}$$

де ΔP - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Для конічної оболонки маємо відомі значення кільцевих та меридіональних напружень, які розраховуються за наступними формулами:

$$\sigma_\alpha = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \delta \cdot \cos \varphi}; \quad \sigma_\beta = \frac{P \cdot R}{\delta \cdot \cos \varphi}$$

Так як при розрахунках використовуємо безмоментну теорію оболонок та гіпотези Кірхгофа-Лява, то напруження по товщині приймаються $\sigma_z = 0$. Отже, маємо плоский напружений стан і розрахунок будемо проводити за допомогою третьої теорії міцності:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} = \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R}{\delta \cdot \cos \varphi}$$

Умовою міцності циліндричної оболонки буде:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p \leq \sigma_{0,2}$$

$$\frac{P_{\text{max}}^p \cdot R}{\delta \cdot \cos \varphi} \leq \sigma_{0,2}$$

Тепер можемо розрахувати товщину:

$$\delta \geq \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R}{\cos \varphi \cdot \sigma_{0,2(t=50^\circ)}}$$

Підставивши значення отримаємо товщину стінки:

$$\delta \geq \frac{0,705 \cdot 1,2}{\cos 45^\circ \cdot 155} = 7,719 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо $\delta = 7,75 \text{ мм}$.

Розрахунок на стійкість

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\text{max}}^p = (P_{\text{н}}^e + P_{\gamma}^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,05 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,705 \text{ МПа}$$

де ΔP - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

$$P_{\text{max}}^p \leq P_{\text{кр}}$$

Визначимо критичну величину тиску:

$$P_{\text{кр}} = K_p \cdot \rho \cdot \frac{E \cdot \delta^{\frac{5}{2}}}{L \cdot R^2} \cdot (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}$$

Коефіцієнт ρ залежить від відношення радіусів усіченого конуса і обчислюється за формулою:

$$\rho = 3,1 - 2,47 \cdot \frac{R_0}{R} = 3,1 - 2,47 \cdot \frac{0,35}{1,2} = 2,74$$

Знайдемо довжину твірної конуса:

$$L = \sqrt{2} \cdot (R - R_0) = \sqrt{2} \cdot (1,2 - 0,35) = 1,45 \text{ м}$$

Виходячи з умови стійкості та значенні критичного тиску можемо визначити необхідну товщину оболонки, коефіцієнти приймаємо $K_p = 0,6$:

$$\delta = \sqrt{\frac{P_{\max}^p \cdot L \cdot R^{\frac{3}{2}}}{K_p \cdot \rho \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}}} = \sqrt{\frac{0,705 \cdot 10^6 \cdot 1,45 \cdot 1,2^{\frac{3}{2}}}{0,6 \cdot 2,74 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}}} = 13,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог прийmemo: $\delta = 13,45 \text{ мм}$

Висновки для нижнього днища з гладкою стінкою

Для забезпечення міцності та стійкості обираємо більше значення з двох отриманих товщин, тобто товщину δ з розрахунку на стійкість.

Отже, остаточно приймаємо: $\delta = 13,45 \text{ мм}$

Проведемо перевірку працездатності такої оболонки, визначивши коефіцієнти запасу міцності та стійкості в критичних значеннях навантажень.

Перевірка роботоспроможності

Розрахуємо коефіцієнт запасу міцності за формулою ($\delta = 13,45 \text{ мм}$):

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_p}$$

$$\text{Де } \sigma_p = \sigma_\beta = \frac{p_{\max}^p \cdot R}{2\delta \cdot \cos \varphi}$$

В результаті отримаємо:

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0.2(t=50^\circ\text{C})} \cdot \delta \cdot \cos \varphi}{p_{\max}^p \cdot R} = \frac{155 \cdot 10^6 \cdot 13,45 \cdot 10^{-3} \cdot (\cos 45)^\frac{3}{2}}{0,705 \cdot 10^6 \cdot 1,2} = 1,742 \geq 1$$

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою ($\delta = 13,45$ мм):

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{max}}^p} = \frac{K_p \cdot \rho \cdot \frac{E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot \delta^{\frac{5}{2}}}{L \cdot R^{\frac{3}{2}}} \cdot (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}}{P_{\text{max}}^p} =$$

$$= \frac{0,6 \cdot 2,74 \cdot \frac{6,6 \cdot 10^{10} \cdot (13,45 \cdot 10^{-3})^{\frac{5}{2}}}{1,45 \cdot 1,2^{\frac{3}{2}}} \cdot (\cos 45)^{\frac{3}{2}}}{0,705 \cdot 10^6} = 1,008 \geq 1$$

Отже, ми отримали працездатну оболонку, оскільки коефіцієнти запасу міцності та стійкості більші одиниці. Така конструкція не забезпечує критерій мінімуму маси, так як запас міцності майже в 2 рази перевищує запас стійкості. З цього можна зробити висновок про раціональність розрахунку підкріпленої оболонки.

Проектувальний розрахунок вафельного конічного днища

В тих випадках, коли днища працюють на стиснення доцільно підкріпляти оболонки підсилюючими елементами, тобто проектувати конструктивно-ортотропну оболонку для того, щоб добитися мінімуму маси. Через це проведемо проектувальний розрахунок вафельного конічного днища.

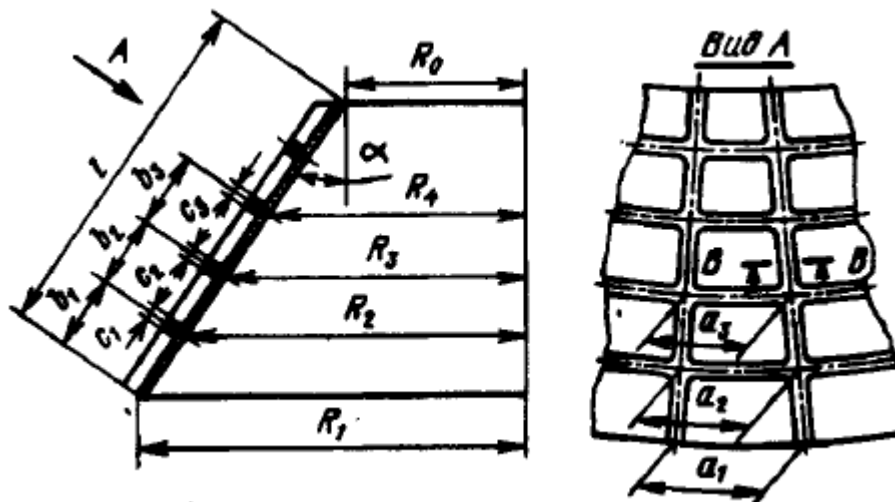


Рис.2

Загальний вид вафельної коніної оболонки

Вирішення проектувальної задачі проводиться по алгоритму, представленому в [1]. Всі розрахунки представлені нижче проведені в програмі MathCAD.

1. Розрахункове значення сили приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки.
2. Задаємо коефіцієнт ефективності конструкції (відношення товщини початкової товщини до товщини стінки): $\psi = 6$.
3. Визначаємо коефіцієнт розподілення товщини: $\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = \frac{0,55}{\sqrt{6}} = 0,225$, де $\varphi = \sqrt{\varphi_1 \varphi_2}$;
4. Задаємо відношення: $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,225$;
5. Розраховуємо число В, прийнявши коефіцієнти $k = 0,7$; $\rho = 2,74$:

$$B = \frac{P_{кр} \cdot L \cdot R^{\frac{3}{2}}}{k \cdot \rho \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,705 \cdot 10^6 \cdot 1,45 \cdot 1,2^{\frac{3}{2}}}{0,7 \cdot 2,74 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}} = 1,785 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{2,5}$$

6. Визначимо товщину стінки оболонки, враховуючи прийняті коефіцієнти:

$$\delta = \left(\frac{B}{\left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2} \cdot \left(\psi^{\frac{5}{2}} - 1 \right) \right)} \right)^{0,4} = 5,016 \cdot 10^{-3}$$

Відповідно до технологічних вимог приймаємо: $\delta = 5,05 \text{ мм}$

7. Визначимо початкову товщину листа, та знайдемо висоту підсилюючих елементів:

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 5,05 \cdot 6 = 30,3 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 30,3 - 5,05 = 25,25 \text{ мм}$$

8. Розрахуємо геометричні параметри підкріплень:

Визначаємо крок першого кільцевого ребра:

$$b_1 = \frac{\delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{k_1 \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot \delta \cdot \cos \varphi}{R \cdot P_{\text{мах}}}} = \frac{5,05}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{4,5 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 5,05 \cdot \cos 45}{1,2 \cdot 0,705 \cdot 10^6}} = 185,45 \text{ мм}$$

9. Далі розраховуємо кроки наступних кільцевих ребер та радіуси кожного кільця та округлимо згідно з технологічними вимогами:

1) друге кільце:

$$R_2 = R_1 - \sin \varphi \cdot \sum_{i=2}^2 b_{i-1} = 1,2 - 185,45 \cdot 10^{-3} \sin 45 = 1,069 \text{ м}$$

$$b_2 = b_1 \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = 185,45 \cdot \sqrt{\frac{1,2}{1,069}} = 196,5 \text{ мм}$$

2) третє кільце

$$R_3 = R_2 - \sin \varphi \cdot \sum_{i=2}^3 b_{i-1} = 1,069 - 381,901 \cdot 10^{-3} \sin 45 = 0,93 \text{ м}$$

$$b_3 = b_2 \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_3}} = 196,473 \cdot \sqrt{\frac{1,069}{0,93}} = 210,65 \text{ мм}$$

3) четверте кільце

$$R_4 = R_3 - \sin \varphi \cdot \sum_{i=2}^4 b_{i-1} = 0,93 - 592,539 \cdot 10^{-3} \sin 45 = 0,781 \text{ м}$$

$$b_4 = b_3 \cdot \sqrt{\frac{R_3}{R_4}} = 210,638 \cdot \sqrt{\frac{0,93}{0,781}} = 229,85 \text{ мм}$$

4) п'яте кільце

$$R_5 = R_4 - \sin \varphi \cdot \sum_{i=2}^5 b_{i-1} = 0,781 - 822,386 \cdot 10^{-3} \sin 45 = 0,618 \text{ м}$$

$$b_5 = b_4 \cdot \sqrt{\frac{R_4}{R_5}} = 229,847 \cdot \sqrt{\frac{0,781}{0,618}} = 258,3 \text{ мм}$$

5) шосте кільце

$$R_6 = R_5 - \sin \varphi \cdot \sum_{i=2}^6 b_{i-1} = 0,618 - 1081 \cdot 10^{-3} \sin 45 = 0,436 \text{ м}$$

$$b_6 = b_5 \cdot \sqrt{\frac{R_5}{R_6}} = 258,287 \cdot \sqrt{\frac{0,618}{0,436}} = 307,7 \text{ мм}$$

10. Далі розраховуємо ширину кожного кільцевого ребра:

$$c_i = \frac{\varphi_2 \cdot b_i}{2 \cdot \pi}$$

Розрахунок проводимо для кожного кільцевого ребра та округлюємо згідно з технологічними вимогами:

1)

$$c_1 = \frac{\varphi_2 \cdot b_1}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 185,45 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 6,65 \text{ мм}$$

2)

$$c_2 = \frac{\varphi_2 \cdot b_2}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 196,473}{2 \cdot \pi} = 7,05 \text{ мм}$$

3)

$$c_3 = \frac{\varphi_2 \cdot b_3}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 210,638}{2 \cdot \pi} = 7,55 \text{ мм}$$

4)

$$c_4 = \frac{\varphi_2 \cdot b_4}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 229,847}{2 \cdot \pi} = 8,25 \text{ мм}$$

5)

$$c_5 = \frac{\varphi_2 \cdot b_5}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 258,287}{2 \cdot \pi} = 9,25 \text{ мм}$$

6)

$$c_6 = \frac{\varphi_2 \cdot b_6}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 307,68}{2 \cdot \pi} = 11 \text{ мм}$$

11. Далі розраховуємо кількість та значення кроку для меридіанних ребер по більшій основі конусу $a_1 = b_1 = 185,45 \text{ мм}$:

$$n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{a_1} = 40,657 = 41$$

Перерахуємо значення a_1 відповідно до обраної кількості:

$$a_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{n} = 183,9$$

12. Розраховуємо товщину та крок радіальних підкріплень для кожного прольоту:

$$a_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_i}{n}; \quad s_i = \frac{\varphi_2}{2 \cdot \pi \cdot \chi};$$

$$s_1 = \frac{0,225 \cdot 183,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \chi} = 6,6 \text{ мм}$$

1)

$$a_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,069}{41} = 163,85 \text{ мм}; \quad s_2 = \frac{0,225 \cdot 163,85 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 5,9 \text{ мм};$$

2)

$$a_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,93}{41} = 142,55 \text{ мм}; \quad s_3 = \frac{0,225 \cdot 142,55 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 5,1 \text{ мм};$$

3)

$$a_4 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,781}{41} = 119,7 \text{ мм}; \quad s_4 = \frac{0,225 \cdot 119,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 4,3 \text{ мм};$$

4)

$$a_5 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,681}{41} = 94,8 \text{ мм}; \quad s_5 = \frac{0,225 \cdot 94,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 3,4 \text{ мм};$$

5)

$$a_6 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,436}{41} = 66,8 \text{ мм}; \quad s_6 = \frac{0,225 \cdot 66,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 2,4 \text{ мм};$$

З проведеного розрахунку геометричних параметрів вафельної конструкції оболонки можна визначити еквівалентну товщину гладкої стінки для оцінки маси. Товщина конструкції буде різною для кожного прольоту між кільцевими ребрами, тому потрібно визначити еквівалентну товщину для кожного прольоту і знайти середнє арифметичне суми отриманих товщин. При цьому будемо враховувати товщину закінцівок, на яких виготовляється гладка стінка.

Товщина закінцівок визначається:

$$\delta_{\text{зак}} = 1,4 \cdot \delta_{\text{гл}} = 1,4 \cdot 13,45 \text{ мм} = 18,83$$

Розрахуємо еквівалентні товщини для кожного прольоту:

1) Для 1-го та 7-го прольоту маємо:

$$\delta_{\text{екв1}} = \delta_{\text{зак}} + \frac{c_1 \cdot h}{2 \cdot b_1} = 19,283 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{екв7}} = \delta_{\text{зак}} + \frac{c_6 \cdot h}{2 \cdot b_7} = 21,102 \text{ мм}$$

2) Для інших прольотів використовуватимемо формули:

$$\delta_{\text{екв}i} = \delta + \frac{(c_i + c_{i+1}) \cdot h}{2 \cdot b_i} + \frac{s_i \cdot h}{a_i} - \frac{(c_i + c_{i+1}) \cdot s_i \cdot h}{2 \cdot a_i \cdot b_i}$$

- 3) В кінці визначаємо середнє арифметичне отриманих значень, що і буде нашою товщиною еквівалентної гладкої оболонки:

$$\delta_{\text{екс}} = \frac{\sum_{i=1}^7 \delta_e}{7} = 7,712 \text{ мм}$$

Висновки для конічної оболонки вафельної конструкції

Отже, при використанні конструктивно-ортотропної оболонки днища бака ми отримали оболонку з еквівалентною товщиною значно меншою за товщину гладкого баку, що свідчить про раціональність використання такої конструкції та виконання умови мінімуму маси.

Проведемо перевірку працездатності такої оболонки, визначивши коефіцієнти запасу міцності та стійкості в критичних значеннях навантажень.

Перевірка робото спроможності

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою:

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{р}}^{\text{п}}};$$

Критичне значення тиску вирахуємо за формулою:

$$P_{\text{кр}} = K_{\text{р}} \cdot \rho \cdot \frac{E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot \delta^{\frac{5}{2}}}{L \cdot R^{\frac{3}{2}}} \left[1 + 0,26 \sqrt[3]{\varphi^2} \cdot \left(\psi^{\frac{5}{2}} - 1 \right) \right]$$

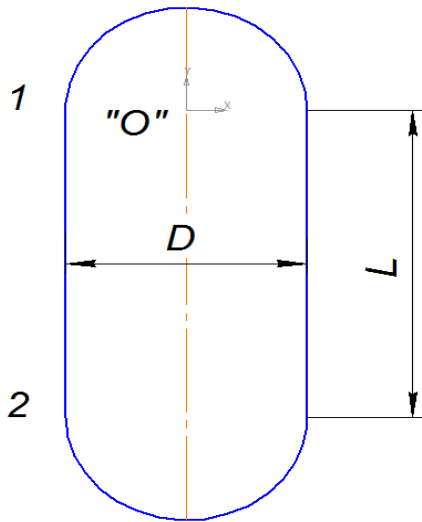
$\eta_{\text{ст}}$

$$= \frac{0,5 \cdot 2,74 \cdot \frac{6,6 \cdot 10^{10} \cdot (5,05 \cdot 10^{-3})^{\frac{5}{2}}}{1,45 \cdot 1,2^{\frac{3}{2}}} \left[1 + 0,26 \sqrt[3]{0,225^2} \cdot \left(6^{\frac{5}{2}} - 1 \right) \right]}{0,705 \cdot 10^6}$$

$$\eta_{\text{ст}} = 1,143 \geq 1$$

Отже, ми отримали працездатну оболонку, оскільки коефіцієнти запасу міцності та стійкості більші одиниці. Така конструкція забезпечує критерій мінімуму маси, так як товщина еквівалентної гладкої стінки майже в 2 рази менша. З цього можна зробити висновок про раціональність проектування та використання підкріпленої оболонки.

Приклад розрахунку несучої циліндричної оболонки баку.



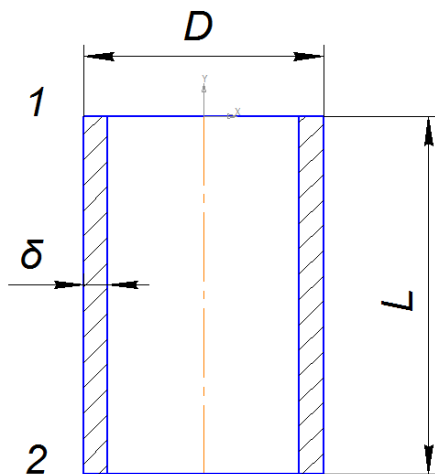
Вихідні дані для розрахунку.

Вихідні данні для розрахунку паливного відсіку: Матеріал оболонки АМГ6Н

D, м	L, м	Розрахунковий випадок	Розріз	$P_{н,}^e$, МПа	$P_{г,}^e$, МПа	T^e , $H \cdot 10^4$	M^e , $H \cdot M \cdot 10^4$	$t, ^\circ C$
2	7	I	1	0.29	0.003	4		1-150°
			2		0.06	4.3		
		II	1	0.24		84	15.2	2-50°
			2		0.04	96	16.1	
		III	1	0.21		421		
			2		0.06	456		
		Днище	В	0.29				
			Н		0.075			

Прийняти $\Delta P = 0.1$ МПа; Коефіцієнти безпеки: $f_p = 1.5$, $f_T = f_M = 1.3$.

Розрахунок гладкої циліндричної, несучої, частини баку



I розрахунковий випадок.

Переріз 1-1.

Матеріал оболонки АМГ6Н, діє гідростатичний тиск та тиск наддуву, а також сила T^e , температура $t = 150^\circ C$

1. Внутрішній розрахунковий тиск дорівнює:

$$P^P = f_p \times (P_e + P_n + \Delta P) = 1,5 \times (0,003 + 0,29 + 0,1) = 0,59 \text{ МПа}$$

2.3 умови міцності знайдемо товщину оболонки

- По кільцевому навантаженню σ_β

$$\sigma_B^{150^\circ\text{C}} = \frac{P^P \times R}{\delta} = \sigma_\beta$$

$$\delta = \frac{P^P \times R}{\sigma_B^{150^\circ\text{C}}} = \frac{0,59 \times 10^6 \times 1}{280 \times 10^6} = 2.105 \text{ мм}$$

- По меридіональному навантаженню σ_α

$$\sigma_\alpha = \sigma'_\alpha + \sigma''_\alpha$$

$$\sigma'_\alpha = \frac{P^P \times R}{2\delta}$$

$$\sigma''_\alpha = -\frac{T}{2 \times \pi \times R \times \delta}$$

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{\delta} \times \left(-\frac{T}{2 \times \pi \times R} + \frac{P^P \times R}{2} \right)$$

$$\left(-\frac{T}{2 \times \pi \times R} + \frac{P^P \times R}{2} \right) = -\frac{4 \times 10^4}{2 \times 3.14 \times 1} + \frac{0,59 \times 10^6 \times 1}{2}$$

$$= 2.884 \times 10^5 \text{ Па} \times \text{м}$$

$$\delta = \frac{\left(-\frac{T}{2 \times \pi \times R} + \frac{P^P \times R}{2} \right)}{\sigma_B^{150^\circ\text{C}}} = \frac{\left(-\frac{4 \times 10^4}{2 \times 3.14 \times 1} + \frac{0,59 \times 10^6 \times 1}{2} \right)}{280 \times 10^6}$$

$$= 1.03 \text{ мм}$$

Переріз 2-2.

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє гідростатичний тиск та тиск наддуву, а також сила T° , температура **t=50°C**

1. Внутрішній розрахунковий тиск дорівнює:

$$P^P = f_p \times (P_c + P_n + \Delta P) = 1,5 \times (0,06 + 0,29 + 0,1) = 0,675 \text{ МПа}$$

2.3 умови міцності знайдемо товщину оболонки

- По кільцевому навантаженню σ_β

$$\sigma_B^{50^\circ\text{C}} = \frac{P^P \times R}{\delta} = \sigma_\beta$$

$$\delta = \frac{P^P \times R}{\sigma_B^{50^\circ\text{C}}} = \frac{0,675 \times 10^6 \times 1}{370 \times 10^6} = 1,824 \text{ мм}$$

- По меридіональному навантаженню σ_α

$$\sigma_\alpha = \sigma'_\alpha + \sigma''_\alpha$$

$$\sigma'_\alpha = \frac{P^P \times R}{2\delta}$$

$$\sigma''_\alpha = -\frac{T}{2 \times \pi \times R \times \delta}$$

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{\delta} \times \left(-\frac{T}{2 \times \pi \times R} + \frac{P^P \times R}{2} \right)$$

$$\left(-\frac{T}{2 \times \pi \times R} + \frac{P^P \times R}{2} \right) = -\frac{4,3 \times 10^4}{2 \times 3,14 \times 1} + \frac{0,675 \times 10^6 \times 1}{2}$$

$$= 3,307 \times 10^5 \text{ Па} \times \text{м}$$

$$\delta = \frac{\left(-\frac{T}{2 \times \pi \times R} + \frac{P^P \times R}{2} \right)}{\sigma_B^{50^\circ\text{C}}} = \frac{\left(-\frac{4,3 \times 10^4}{2 \times 3,14 \times 1} + \frac{0,675 \times 10^6 \times 1}{2} \right)}{370 \times 10^6}$$

$$= 0,894 \text{ мм}$$

II розрахунковий випадок.

Переріз 1-1

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву ,сила T° ,момент M° , температура **t=150°С**

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{\text{мин}}^P = f_p \times (P_n - \Delta P) = 1,5 \times (0,24 - 0,1) = 0,21 \text{ МПа}$$

2. З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$T_{\text{екв}} = f_m \times T + \frac{2M \times f_m}{R_{II}} - \pi \times P_{\text{мин}}^P \times R_{II}^2 =$$

$$= 1,5 \times 84 \cdot 10^4 + \frac{2 \times 15,2 \cdot 10^4 \times 1,5}{1} - 3,14 \times 0,21 \cdot 10^6 \times 1^2 =$$

$$= 8,275 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

3. Оболонка працює на стискання. У цьому випадку застосовується ітераційна процедура уточнення.

$$P^P = f_p \times (P_n + \Delta P) = 1,5 \times (0,24 + 0,1) = 0,51 \text{ МПа}$$

I ітерація.

Коефіцієнт досконалості приймаємо:

$$K_0 = 0,18$$

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_0 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{8,275 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,18 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} \\ = 3,329 \text{ мм}$$

$$p_1 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_0}\right)^2 = \frac{0,51 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{3,329 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,697 < 0,8$$

$$K_1 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_1} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,697} = 0,401$$

$$\frac{|K_1 - K_0|}{K_0} \times 100\% = \frac{|0,401 - 0,18|}{0,18} \times 100\% = 122,9\% > 1\%$$

II ітерація.

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_1 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{8,275 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,401 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} \\ = 2,23 \text{ мм}$$

$$p_2 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_1}\right)^2 = \frac{0,51 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{2,23 \times 10^{-3}}\right)^2 = 1,554 > 0,8$$

$$K_2 = 0,42$$

$$\frac{|K_2 - K_1|}{K_1} \times 100\% = \frac{|0,42 - 0,401|}{0,401} \times 100\% = 4,673\% > 1\%$$

III ітерація.

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_2 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{8,275 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,42 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} \\ = 2,18 \text{ мм}$$

$$p_3 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_2}\right)^2 = \frac{0,51 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{2,18 \times 10^{-3}}\right)^2 = 1,626 > 0,8$$

$$K_3 = 0,42$$

$$\frac{|K_3 - K_2|}{K_2} \times 100\% = \frac{|0,42 - 0,42|}{0,42} \times 100\% = 0\% < 1\%$$

Округляємо: $\delta_{\text{ц}} = 2,2 \text{ мм}$

Переріз 2-2

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву та гідростатичний тиск, сила T^e , момент M^e , температура $t=50^\circ\text{C}$

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{\text{мин}}^P = f_p \times (P_n + P_c - \Delta P) = 1,5 \times (0,24 + 0,04 - 0,1) = 0,27 \text{ МПа}$$

2. З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$\begin{aligned} T_{\text{екв}} &= f_m \times T + \frac{2M \times f_m}{R_{\text{ц}}} - \pi \times P_{\text{мин}}^P \times R_{\text{ц}}^2 = \\ &= 1,5 \times 96 \cdot 10^4 + \frac{2 \times 16,1 \cdot 10^4 \times 1,5}{1} - 3,14 \times 0,27 \cdot 10^6 \times 1^2 = \\ &= 8,184 \cdot 10^5 \text{ Н} \end{aligned}$$

3. Оболонка працює на стискання. У цьому випадку застосовується ітераційна процедура уточнення.

$$P^P = f_p \times (P_n + \Delta P + P_c) = 1,5 \times (0,24 + 0,1 + 0,04) = 0,57 \text{ МПа}$$

I ітерація.

Коефіцієнт досконалості приймаємо:

$$K_0 = 0,18$$

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}}{2 \times \pi \times K_0 \times E^{50^\circ\text{C}}}} = \sqrt{\frac{8,184 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,18 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ &= 3,532 \text{ мм} \end{aligned}$$

$$p_1 = \frac{P^P}{E^{50^\circ\text{C}}} \times \left(\frac{R}{\delta_0}\right)^2 = \frac{0,57 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{3,532 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,788 < 0,8$$

$$K_1 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_1} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,788} = 0,415$$

$$\frac{|K_1 - K_0|}{K_0} \times 100\% = \frac{|0,415 - 0,18|}{0,18} \times 100\% = 130,6\% > 1\%$$

II ітерація.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}}{2 \times \pi \times K_1 \times E^{50^\circ\text{C}}}} = \sqrt{\frac{8,184 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,415 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ &= 2,326 \text{ мм} \end{aligned}$$

$$p_2 = \frac{P^P}{E^{50^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_1} \right)^2 = \frac{0,57 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{2,326 \times 10^{-3}} \right)^2 = 1,817 > 0,8$$

$$K_2 = 0,42$$

$$\frac{|K_2 - K_1|}{K_1} \times 100\% = \frac{|0,42 - 0,415|}{0,415} \times 100\% = 1,156\% > 1\%$$

III ітерація.

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_2 \times E^{50^\circ C}}} = \sqrt{\frac{8,184 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,42 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} = 2,312 \text{ мм}$$

$$p_3 = \frac{P^P}{E^{50^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_2} \right)^2 = \frac{0,57 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{2,312 \times 10^{-3}} \right)^2 = 1,838 > 0,8$$

$$K_3 = 0,42$$

$$\frac{|K_3 - K_2|}{K_2} \times 100\% = \frac{|0,42 - 0,42|}{0,42} \times 100\% = 0\% < 1\%$$

Округляємо: $\delta_{\text{и}} = 2,35 \text{ мм}$

III розрахунковий випадок.

Переріз 1-1

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву ,сила T° , температура **t=150°с**

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{\text{мин}}^P = f_p \times (P_n - \Delta P) = 1,5 \times (0,21 - 0,1) = 0,165 \text{ МПа}$$

2. З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$\begin{aligned} T_{екв} &= f_m \times T - \pi \times P_{\text{мин}}^P \times R_{\text{и}}^2 = \\ &= 1,5 \times 421 \cdot 10^4 - 3,14 \times 0,165 \cdot 10^6 \times 1^2 = \\ &= 4,955 \cdot 10^6 \text{ Н} \end{aligned}$$

3. Оболонка працює на стискання. У цьому випадку застосовується ітераційна процедура уточнення.

$$P^P = f_p \times (P_n + \Delta P) = 1,5 \times (0,21 + 0,1) = 0,465 \text{ МПа}$$

I ітерація.

Коефіцієнт досконалості приймаємо:

$$K_0 = 0,18$$

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_0 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{4,955 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,18 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} = 8,147 \text{ мм}$$

$$p_1 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_0}\right)^2 = \frac{0,465 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{8,147 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,106 < 0,8$$

$$K_1 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_1} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,106} = 0,266$$

$$\frac{|K_1 - K_0|}{K_0} \times 100\% = \frac{|0,266 - 0,18|}{0,18} \times 100\% = 47,965\% > 1\%$$

II ітерація.

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_1 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{4,955 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,266 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} = 6,698 \text{ мм}$$

$$p_2 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_1}\right)^2 = \frac{0,465 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{6,698 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,157 < 0,8$$

$$K_2 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_2} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,157} = 0,285$$

$$\frac{|K_2 - K_1|}{K_1} \times 100\% = \frac{|0,285 - 0,266|}{0,266} \times 100\% = 7,015\% > 1\%$$

III ітерація.

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_2 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{4,955 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,285 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} = 6,475 \text{ мм}$$

$$p_3 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_2}\right)^2 = \frac{0,465 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{6,475 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,168 < 0,8$$

$$K_3 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_3} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,168} = 0,289$$

$$\frac{|K_3 - K_2|}{K_2} \times 100\% = \frac{|0,289 - 0,285|}{0,285} \times 100\% = 1,271\% > 1\%$$

IV ітерація.

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_3 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{4,955 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,289 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} \\ = 6,434 \text{ мм}$$

$$p_4 = \frac{P^P}{E^{150^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_3}\right)^2 = \frac{0,465 \times 10^6}{6,6 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{6,434 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,17 < 0,8$$

$$K_4 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_4} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,17} = 0,29$$

$$\frac{|K_4 - K_3|}{K_3} \times 100\% = \frac{|0,29 - 0,289|}{0,289} \times 100\% = 0,238\% < 1\%$$

$$\delta_4 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_4 \times E^{150^\circ C}}} = \sqrt{\frac{4,955 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,29 \times 6,6 \cdot 10^{10}}} \\ = 6,426 \text{ мм}$$

Округляємо: $\delta_{ц} = 6,45 \text{ мм}$

Переріз 2-2

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву та гідростатичний тиск, сила T° , температура **t=50°c**

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{мин}^P = f_p \times (P_n + P_z - \Delta P) = 1,5 \times (0,21 + 0,06 - 0,1) \\ = 0,255 \text{ МПа}$$

2. З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$T_{екв} = f_m \times T - \pi \times P_{мин}^P \times R_{ц}^2 = \\ = 1,5 \times 459 \cdot 10^4 - 3,14 \times 0,255 \cdot 10^6 \times 1^2 = \\ = 5,127 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

3. Оболонка працює на стискання. У цьому випадку застосовується ітераційна процедура уточнення.

$$P^P = f_p \times (P_n + P_z + \Delta P) = 1,5 \times (0,21 + 0,06 + 0,1) = 0,555 \text{ МПа}$$

I ітерація.

Коефіцієнт досконалості приймаємо:

$$K_0 = 0,18$$

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_0 \times E^{50^\circ C}}} = \sqrt{\frac{5,127 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,18 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ = 8,841 \text{ мм}$$

$$p_1 = \frac{P^P}{E^{50^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_0}\right)^2 = \frac{0,555 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{8,841 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,122 < 0,8$$

$$K_1 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_1} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,122} = 0,273$$

$$\frac{|K_1 - K_0|}{K_0} \times 100\% = \frac{|0,273 - 0,18|}{0,18} \times 100\% = 51,513\% > 1\%$$

II ітерація.

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_1 \times E^{50^\circ C}}} = \sqrt{\frac{5,127 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,266 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ = 7,182 \text{ мм}$$

$$p_2 = \frac{P^P}{E^{50^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_1}\right)^2 = \frac{0,555 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{7,182 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,185 < 0,8$$

$$K_2 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_2} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,185} = 0,294$$

$$\frac{|K_2 - K_1|}{K_1} \times 100\% = \frac{|0,295 - 0,273|}{0,273} \times 100\% = 7,851\% > 1\%$$

III ітерація.

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_2 \times E^{50^\circ C}}} = \sqrt{\frac{5,127 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,294 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ = 6,916 \text{ мм}$$

$$p_3 = \frac{P^P}{E^{50^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_2}\right)^2 = \frac{0,555 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{6,916 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,2 < 0,8$$

$$K_3 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_3} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,2} = 0,299$$

$$\frac{|K_3 - K_2|}{K_2} \times 100\% = \frac{|0,299 - 0,294|}{0,294} \times 100\% = 1,494\% > 1\%$$

IV ітерація.

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_3 \times E^{50^\circ C}}} = \sqrt{\frac{5,127 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,299 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ = 6,865 \text{ мм}$$

$$p_4 = \frac{P^P}{E^{50^\circ C}} \times \left(\frac{R}{\delta_3}\right)^2 = \frac{0,555 \times 10^6}{5,8 \cdot 10^{10}} \times \left(\frac{1}{6,865 \times 10^{-3}}\right)^2 = 0,203 < 0,8$$

$$K_4 = K_0 + 0,265 \times \sqrt{p_4} = 0,18 + 0,265 \times \sqrt{0,203} = 0,3$$

$$\frac{|K_4 - K_3|}{K_3} \times 100\% = \frac{|0,3 - 0,299|}{0,299} \times 100\% = 0,296\% < 1\%$$

$$\delta_4 = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K_4 \times E^{50^\circ C}}} = \sqrt{\frac{5,127 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,3 \times 5,8 \cdot 10^{10}}} \\ = 6,855 \text{ мм}$$

Округляємо: $\delta_u = 6,9 \text{ мм}$

4. Знаходимо максимальну товщину з усіх розрахункових випадків, та приймаємо її як товщину циліндричної оболонки:

$$\delta_u = 6,9 \text{ мм}$$

5. Знаходимо коефіцієнт запасу стійкості

$$\eta = \frac{T_{кр}}{T_{екв}} = \frac{2 \times \pi \times K_4 \times \delta_u^2 \times E^{50^\circ C}}{T_{екв}} =$$

$$= \frac{2 \times 3,14 \times 0,3 \times 6,9 \times 10^{-3} \times 5,8 \cdot 10^{10}}{5,127 \cdot 10^6} = 1,015 \geq 1$$

Працездатність циліндричної оболонки забезпечена.

6. Визначаємо масу гладкої циліндричної оболонки

- Товщина за кінцівки:

$$\delta_{зак} = 1,2 \times \delta_u = 1,2 \times 6,9 = 8,28 \text{ мм}$$

- Довжина за кінцівки

$$L_{зак} = (5 \div 7) \times \delta_{зак} = (5 \div 7) \times 8,28 = 41,4 \text{ мм} \div 57,96 \text{ мм}$$

Обираю $L_{зак} = 45\text{мм}$

- Знаходимо вагу закінцівок

$$M_{зак}1 = (2 \times \pi \times R_{\psi} \times L_{зак} \times \delta_{зак} \times \gamma) \times 2 = 2 \times 3.14 \times 1 \times 45 \times 10^{-3} \times 8,28 \times 10^{-3} \times 2650 = 12,408 \text{ кг}$$

$$\begin{aligned} M_{зак}2 &= (\delta_{зак} \times L_{зак} \times (L - 2 \times L_{зак}) \times \gamma) \times 2 \\ &= (8,28 \times 10^{-3} \times 45 \times 10^{-3} \times (7 - 2 \times 45 \times 10^{-3}) \\ &\quad \times 2650) \times 2 = 13,646 \text{ кг} \end{aligned}$$

- Вага циліндра без закінцівок

$$\begin{aligned} M_{\psi} &= (2 \times \pi \times R - 2 \times L_{зак}) \times (L - 2 \times L_{зак}) \times \delta_{\psi} \times \gamma = \\ &= (2 \times 3,14 \times 1 - 2 \times 45 \times 10^{-3}) \times (7 - 2 \times 45 \times 10^{-3}) \times \\ &\quad 6,9 \times 10^{-3} \times 2650 = 782,505 \text{ кг} \end{aligned}$$

- Загальна вага гладкої циліндричної оболонки

$$\begin{aligned} M &= M_{зак}1 + M_{зак}2 + M_{\psi} = 12,408 + 13,646 + 782,505 \\ &= 808,559 \text{ кг} \end{aligned}$$

Розрахунок вафельної циліндричної, несучої, частини баку

II розрахунковий випадок.

Переріз 1-1

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву ,сила T^e ,момент M^e , температура $t=150^\circ\text{C}$

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{мин}^P = f_p \times (P_n - \Delta P) = 1,5 \times (0,24 - 0,1) = 0,21 \text{ МПа}$$

З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$\begin{aligned} T_{екв} &= f_m \times T + \frac{2M \times f_m}{R_{II}} - \pi \times P_{мин}^P \times R_{II}^2 = \\ &= 1,5 \times 84 \cdot 10^4 + \frac{2 \times 15,2 \cdot 10^4 \times 1,5}{1} - 3,14 \times 0,21 \cdot 10^6 \times 1^2 = \\ &= 8,275 \cdot 10^5 \text{ Н} \end{aligned}$$

2. Задаємося ψ

$$\psi = 4$$

3. Визначаємо значення коефіцієнта підкріплення з умови мінімум ваги конструкції

$$\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = 0,275$$

4. В цій курсовій роботі з умови технологічних рекомендацій будемо використовувати квадратну ячейку, тобто:

$$\psi_1 = \psi, \quad \psi_2 = \psi$$

5. Розрахунок конструкції приймаємо з умови рівності жорсткості. Знаходимо товщину клітини :

Приймаємо : $K=0,28$

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K \times E^{150^\circ\text{C}} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{\varphi^2} \times (\psi^2 - 1)]}} = \\ &= \sqrt{\frac{8,275 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,28 \times 6,6 \cdot 10^{10} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{0,275^2} \times (4^2 - 1)]}} = \\ &= 1,602 \text{ мм} \end{aligned}$$

Округляємо:

$$\delta = 1,65 \text{ мм}$$

6. По знайдений товщині знаходимо вихідну товщину заготовки пластини, та висоту клітини

$$\delta_{\text{ісх}} = \delta \times \psi = 1,65 \times 4 = 6,6 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{ісх}} - \delta = 6,6 - 1,65 = 4,95 \text{ мм}$$

7. По знайдений товщині клітини знаходимо еквівалентну товщину

$$\begin{aligned} \delta_{\text{екв}} &= \delta \times [1 + 0,16 \times \varphi \times (\psi - 1)] \\ &= 1,65 \times [1 + 0,16 \times 0,275 \times (4 - 1)] = \\ &= 1,868 \text{ мм} \end{aligned}$$

Переріз 2-2

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву та гідростатичний тиск, сила T^e , момент M^e , температура $t=50^\circ\text{C}$

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{\text{мин}}^P = f_p \times (P_n + P_c - \Delta P) = 1,5 \times (0,24 + 0,04 - 0,1) = 0,27 \text{ МПа}$$

З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$\begin{aligned} T_{\text{екв}} &= f_m \times T + \frac{2M \times f_m}{R_{\text{ц}}} - \pi \times P_{\text{мин}}^P \times R_{\text{ц}}^2 = \\ &= 1,5 \times 96 \cdot 10^4 + \frac{2 \times 16,1 \cdot 10^4 \times 1,5}{1} - 3,14 \times 0,27 \cdot 10^6 \times 1^2 = \\ &= 8,184 \cdot 10^5 \text{ Н} \end{aligned}$$

2. Задаємося ψ

$$\psi = 4$$

3. Визначаємо значення коефіцієнта підкріплення з умови мінімум ваги конструкції

$$\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = 0,275$$

4. В цій курсовій роботі з умови технологічних рекомендацій будемо використовувати квадратну ячейку, тобто:

$$\psi_1 = \psi$$

$$\psi_2 = \psi$$

5. Розрахунок конструкції приймаємо з умови рівності жорсткості.
Знаходимо товщину клітини :

Приймаємо : $K = 0,28$

$$\delta = \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K \times E^{50^\circ C} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{\varphi^2} \times (\psi^2 - 1)]}} =$$

$$= \sqrt{\frac{8,184 \cdot 10^5}{2 \times 3,14 \times 0,28 \times 5,8 \cdot 10^{10} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{0,275^2} \times (4^2 - 1)]}} =$$

$$= 1,7 \text{ мм}$$

Округляємо:

$$\delta = 1,7 \text{ мм}$$

6. По знайдений товщині знаходимо вихідну товщину заготовки пластини, та висоту клітини

$$\delta_{ісх} = \delta \times \psi = 1,7 \times 4 = 6,8 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{ісх} - \delta = 6,8 - 1,7 = 5,1 \text{ мм}$$

7. По знайдений товщині клітини знаходимо еквівалентну товщину

$$\delta_{екв} = \delta \times [1 + 0,16 \times \varphi \times (\psi - 1)]$$

$$= 1,7 \times [1 + 0,16 \times 0,275 \times (4 - 1)] =$$

$$= 1,924 \text{ мм}$$

III розрахунковий випадок.

Переріз 1-1

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву , сила T° ,
температура **t=150°c**

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{мин}^P = f_p \times (P_n - \Delta P) = 1,5 \times (0,21 - 0,1) = 0,165 \text{ МПа}$$

З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$T_{екв} = f_m \times T - \pi \times P_{мин}^P \times R_y^2 =$$

$$= 1,5 \times 421 \cdot 10^4 - 3,14 \times 0,165 \cdot 10^6 \times 1^2 =$$

$$= 4,955 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

2. Задаємося ψ

$$\psi = 4$$

3. Визначаємо значення коефіцієнта підкріплення з умови мінімум ваги конструкції

$$\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = 0,275$$

4. В цій курсовій роботі з умови технологічних рекомендацій будемо використовувати квадратну ячейку, тобто:

$$\psi_1 = \psi$$

$$\psi_2 = \psi$$

5. Розрахунок конструкції приймаємо з умови рівності жорсткості. Знаходимо товщину клітини :

Приймаємо : $K = 0,28$

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K \times E^{150^{\circ}C} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{\varphi^2} \times (\psi^2 - 1)]}} = \\ &= \sqrt{\frac{4,955 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,28 \times 6,6 \cdot 10^{10} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{0,275^2} \times (4^2 - 1)]}} = \\ &= 3,921 \text{ мм} \end{aligned}$$

Округляємо:

$$\delta = 3,95 \text{ мм}$$

6. По знайдений товщині знаходимо вихідну товщину заготовки пластини, та висоту клітини

$$\delta_{ісх} = \delta \times \psi = 3,95 \times 4 = 15,8 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{ісх} - \delta = 15,8 - 3,95 = 11,85 \text{ мм}$$

7. По знайдений товщині клітини знаходимо еквівалентну товщину

$$\begin{aligned} \delta_{екв} &= \delta \times [1 + 0,16 \times \varphi \times (\psi - 1)] \\ &= 3,95 \times [1 + 0,16 \times 0,275 \times (4 - 1)] = \\ &= 4,471 \text{ мм} \end{aligned}$$

Переріз 2-2

Матеріал оболонки **АМг6Н**, діє тиск наддуву та гідростатичний тиск, сила T° , температура **t=50°c**

1. Визначаємо мінімальний розрахунковий тиск:

$$P_{мин}^P = f_p \times (P_n + P_z - \Delta P) = 1,5 \times (0,21 + 0,06 - 0,1) = 0,255 \text{ МПа}$$

З урахуванням тиску, визначаємо еквівалентну осьову силу:

$$\begin{aligned} T_{екв} &= f_m \times T - \pi \times P_{мин}^P \times R_{ц}^2 = \\ &= 1,5 \times 459 \cdot 10^4 - 3,14 \times 0,255 \cdot 10^6 \times 1^2 = \\ &= 5,127 \cdot 10^6 \text{ Н} \end{aligned}$$

2. Задаємося ψ

$$\psi = 4$$

3. Визначаємо значення коефіцієнта підкріплення з умови мінімум ваги конструкції

$$\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = 0,275$$

4. В цій курсовій роботі з умови технологічних рекомендацій будемо використовувати квадратну ячейку, тобто:

$$\psi_1 = \psi$$

$$\psi_2 = \psi$$

5. Розрахунок конструкції приймаємо з умови рівності жорсткості. Знаходимо товщину клітини :

Приймаємо : $K = 0,28$

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{T_{екв}}{2 \times \pi \times K \times E^{50^\circ C} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{\varphi^2} \times (\psi^2 - 1)]}} = \\ &= \sqrt{\frac{5,127 \cdot 10^6}{2 \times 3,14 \times 0,28 \times 5,8 \cdot 10^{10} \times [1 + 0,28 \times \sqrt[3]{0,275^2} \times (4^2 - 1)]}} = \\ &= 4,256 \text{ мм} \end{aligned}$$

Округляємо:

$$\delta = 4,3 \text{ мм}$$

6. По знайденій товщині знаходимо вихідну товщину заготовки пластини, та висоту клітини

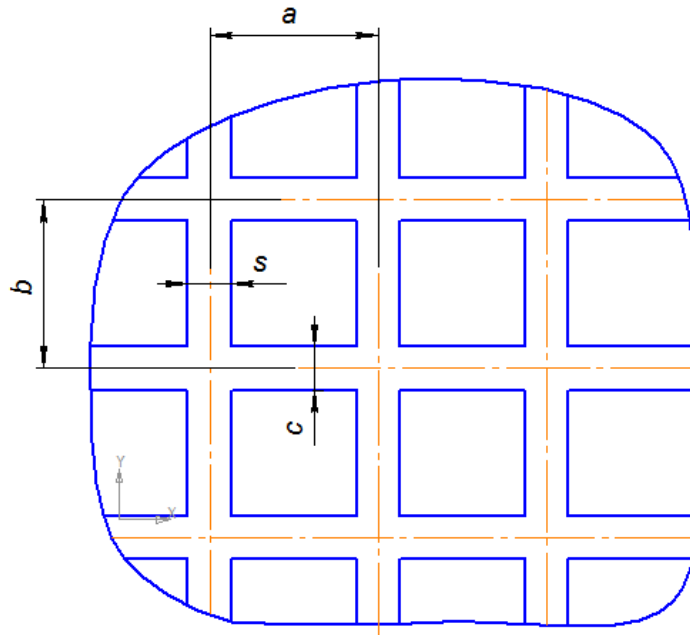
$$\delta_{ісх} = \delta \times \psi = 4,3 \times 4 = 17,2 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{ісх} - \delta = 17,2 - 4,3 = 12,9 \text{ мм}$$

7. По знайдений товщині клітини знаходимо еквівалентну товщину

$$\begin{aligned}\delta_{\text{екв}} &= \delta \times [1 + 0,16 \times \varphi \times (\psi - 1)] \\ &= 4,3 \times [1 + 0,16 \times 0,275 \times (4 - 1)] = \\ &= 4,861 \text{ мм}\end{aligned}$$

З усіх розрахункових випадків обираємо максимальну $\delta_{\text{екв}}$ і продовжуємо розрахунок геометрії клітки



$$\delta_{\text{екв}} = 4,861 \text{ мм}$$

1.3 умови рівномірності і рівностійкості клітки вафлі визначаємо розміри клітини вафельної оболонки:

$$K_1 = 6$$

$$\begin{aligned}a &= \frac{2,5 \times \delta}{1 - \frac{\varphi}{2 \times \pi}} \times \sqrt{\frac{R \times K_1 \times E^{50^\circ\text{C}} \times \delta_{\text{екв}}}{T_{\text{екв}}}} = \\ &= \frac{2,5 \times 4,3 \times 10^{-3}}{1 - \frac{0,275}{2 \times 3,14}} \times \sqrt{\frac{1 \times 6 \times 5,8 \times 10^{10} \times 4,861 \times 10^{-3}}{5,127 \cdot 10^6}} = \\ &= 204,345 \text{ мм}\end{aligned}$$

Для коректного підбору за кінцівок я прийняв значення розміру **a** таким:

$$a = 197,35 \text{ мм}$$

Виходячи з того що клітина квадратна то :

$$b = a = 197,35 \text{ мм}$$

2. З допущення і габаритів бака визначаємо розміри меридіонального і кільцевого підкріплення:

$$s = \frac{\varphi \times a}{2 \times \pi} = \frac{0,275 \times 197,35}{2 \times 3,14} = 8,638 \text{ мм}$$

Округляємо:

$$s = 8,65 \text{ мм}$$

Виходячи з того що клітина квадратна то :

$$c = s = 8,65 \text{ мм}$$

3. Знаходимо оптимальну величину за кінцівок, використовуючи товщину гладкої циліндричної оболонки

- Товщина за кінцівки:

$$\delta_{зак} = 1,2 \times \delta_{ц} = 1,2 \times 6,9 = 8,28 \text{ мм}$$

- Довжина за кінцівки

$$L_{зак} = (5 \div 7) \times \delta_{зак} = (5 \div 10) \times 8,28 = 41,4 \text{ мм} \div 82,28 \text{ мм}$$

4. Визначаю кількість стрингерів і за кінцівку

$$N_{стр1} = \frac{2 \times \pi \times R}{a} = \frac{2 \times 3,14 \times 1}{197,35} = 31,838$$

Округляємо :

$$N_{стр} = 31$$

Знаходимо за кінцівку

$$n = N_{стр1} - N_{стр} = 31,838 - 31 = 0,838$$

$$L_{зак} C = \frac{n \times a}{2} - \frac{s}{2} = \frac{0,838 \times 197,35}{2} \times \frac{8,65}{2} = 78,343 \text{ мм}$$

5. Визначаю кількість шпангоутів і за кінцівку

$$N_{ун1} = \frac{L}{b} = \frac{7}{197,35 \times 10^{-3}} = 35,47$$

Округляємо :

$$N_{ун} = 35$$

Знаходимо за кінцівку

$$n = N_{\text{шп1}} - N_{\text{шп}} = 35,47 - 35 = 0,47$$

$$L_{\text{зак}}^{\text{Ш}} = \frac{n \times b}{2} - \frac{c}{2} = \frac{0,47 \times 197,35}{2} - \frac{8,65}{2} = 42,05 \text{ мм}$$

6. Знайдені розміри оболонки дозволяють визначити значення еквівалентної товщини вафельної оболонки:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{екв}} &= \delta + \frac{c \times h}{b} + \frac{s \times h}{a} - \frac{c \times s \times h}{a \times b} = \\ &= 4,3 + \frac{8,65 \times 12,9}{197,35} + \frac{8,65 \times 12,9}{197,35} - \frac{8,65 \times 8,65 \times 12,9}{197,35 \times 197,35} \\ &= 5,406 \text{ мм} \end{aligned}$$

7. Виконуємо перевірку за загальною та місцевою втратою стійкості

$$\begin{aligned} T_{\text{кр.з}} &= 2 \times \pi \times K \times E^{50^\circ\text{C}} \times \delta^2 \times \left[1 + 0,28 \times \sqrt[3]{\varphi^2} \times (\psi^2 - 1) \right] = \\ &= 2 \times 3,14 \times 0,28 \times 5,8 \cdot 10^{10} \\ &\times 4,3^2 \left[1 + 0,28 \times \sqrt[3]{0,275^2} \times (4^2 - 1) \right] \\ &= 5,241 \times 10^6 \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{ст.з}} = \frac{T_{\text{кр.з}}}{T_{\text{екв}}} = \frac{5,241 \times 10^6}{5,127 \cdot 10^6} = 1,022 > 1$$

$$\begin{aligned} T_{\text{кр.м}} &= \left(\frac{2,5 \times \delta}{1 - \frac{\varphi}{2 \times \pi}} \right)^2 \times \frac{1}{a^2} \times R \times K_1 \times E^{50^\circ\text{C}} \times \delta_{\text{екв}} = \\ &= \left(\frac{2,5 \times 4,3 \times 10^{-3}}{1 - \frac{0,275}{2 \times 3,14}} \right)^2 \times \frac{1}{197,35^2} \times 1 \times 6 \times 5,8 \times 10^{10} \times 5,406 \\ &\times 10^{-3} = \\ &= 6,106 \times 10^6 \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{ст.м}} = \frac{T_{\text{кр.м}}}{T_{\text{екв}}} = \frac{6,106 \times 10^6}{5,127 \cdot 10^6} = 1,191 > 1$$

Працездатність вафельної циліндричної оболонки забезпечена.

Визначаємо масу вафельної циліндричної оболонки

- Знаходимо вагу закінцівок

$$M_{зак1} = (2 \times \pi \times R_{ц} \times L_{закIII} \times \delta_{зак} \times \gamma) \times 2 = 2 \times 3.14 \times 1 \times 42,05 \times 10^{-3} \times 8,28 \times 10^{-3} \times 2650 = 11,595 \text{ кг}$$

$$M_{зак2} = (\delta_{зак} \times L_{закC} \times (L - 2 \times L_{закIII}) \times \gamma) \times 2 = (8,28 \times 10^{-3} \times 78,343 \times 10^{-3} \times (7 - 42,05 \times 10^{-3}) \times 2650) \times 2 = 23,777 \text{ кг}$$

- Вага циліндра без закінцівок

$$M_{ц} = (2 \times \pi \times R - 2 \times L_{закC}) \times (L - 2 \times L_{закIII}) \times \delta_{екв} \times \gamma = (2 \times 3,14 \times 1 - 2 \times 78,343 \times 10^{-3}) \times (7 - 2 \times 42,05 \times 10^{-3}) \times 5,404 \times 10^{-3} \times 2650 = 606,767 \text{ кг}$$

- Загальна вага вафельної циліндричної оболонки

$$M = M_{зак1} + M_{зак2} + M_{ц} = 11,595 + 23,777 + 606,767 \\ = 642,136 \text{ кг}$$

Проектувальний розрахунок днищ бака

Розрахунок верхнього днища бака

В даній конструкції використовується ввігнуте сферичне днище, що навантажене внутрішнім тиском в баці. Тож, даний конструкційний елемент працює на стиск в результаті дії тиску, необхідно проводити розрахунок на міцність та стійкість. Використовуємо розрахункову схему представлену на рис.5. Початкові данні: радіус сфери $R=1560$ мм. Тиск надуву $P_n^e = 0,32$ МПа. Матеріал АМГ6М. Температура навантаження 150^0 С.

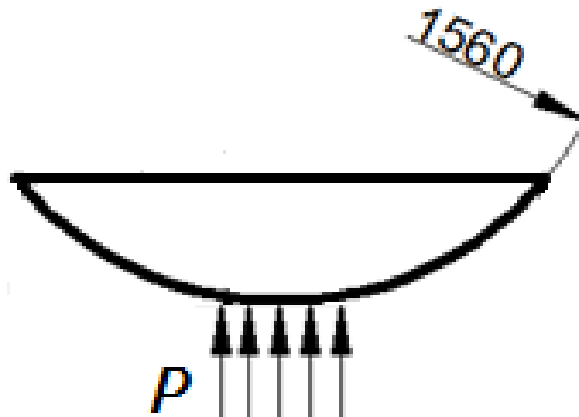


Рис.3

Розрахункова схема верхнього днища

Проектувальний розрахунок гладкого сферичного днища

Розрахунок на міцність

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\max}^p = (P_n^e + \Delta P) * f_p = (0,32 + 0,1) * 1,5 = 0,63 \text{ МПа}$$

де ΔP - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Для сфери маємо відомі значення кільцевих та меридіональних напружень, які розраховуються за наступними формулами:

$$\sigma_\alpha = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \delta}; \quad \sigma_\beta = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \delta}$$

Так як при розрахунках використовуємо безмоментну теорію оболонок та гіпотези Кірхгофа-Лява, то напруження по товщині приймаються $\sigma_z = 0$. Отже, маємо плоский напружений стан і розрахунок будемо проводити за допомогою третьої теорії міцності:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} = \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}}{2 \cdot \delta}$$

Умовою міцності циліндричної оболонки буде:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p \leq \sigma_{0,2}$$

$$\frac{p_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}}{2 \cdot \delta} \leq \sigma_{0,2}$$

Тепер можемо розрахувати товщину:

$$\delta \geq \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}}{2 \cdot \sigma_{0,2}(t=150^\circ)}$$

Підставивши значення отримаємо товщину стінки:

$$\delta \geq \frac{0,63 \cdot 1,2}{2 \cdot 130} = 3,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо значення товщини $\delta = 3,8 \text{ мм}$

Розрахунок на стійкість

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\text{max}}^p = (P_{\text{н}}^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,63 \text{ МПа}$$

де ΔP - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

$$P_{\text{max}}^p \leq P_{\text{кр}}$$

Визначимо критичну величину тиску:

$$P_{\text{кр}} = 2 \cdot K_3 \cdot K_p \cdot E \cdot \left(\frac{\delta_{\text{сф}}}{R_{\text{сф}}} \right)^2$$

Виходячи з умови стійкості та значенні критичного тиску можемо визначити необхідну товщину оболонки, коефіцієнти приймаємо

$$K_3 = 0,3; K_p = 0,8:$$

$$\begin{aligned} \delta_{\text{сф}} &= \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}^2}{2 \cdot K_3 \cdot K_p \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})}}} = \sqrt{\frac{0,63 \cdot 10^6 \cdot 1,56^2}{2 \cdot 0,3 \cdot 0,8 \cdot 6,6 \cdot 10^{10}}} \\ &= 7,358 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

Відповідно до технологічних вимог прийmemo: $\delta = 7,4$ мм

Висновки для верхнього днища з гладкою стінкою

Для забезпечення міцності та стійкості обираємо більше значення з двох отриманих товщин, тобто товщину в з розрахунку на стійкість.

Отже, остаточно приймаємо: $\delta = 7,4$ мм

Проведемо перевірку працездатності такої оболонки, визначивши коефіцієнти запасу міцності та стійкості в критичних значеннях навантажень.

Перевірка роботоспроможності

Розрахуємо коефіцієнт запасу міцності за формулою ($\delta = 7,4$ мм):

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_p}, \quad \text{де } \sigma_p = \sigma_\alpha = \sigma_\beta = \frac{p_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}}{2 \cdot \delta}$$

В результаті отримаємо:

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0.2(t=150^\circ\text{C})} \cdot 2 \cdot \delta}{p_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}} = \frac{130 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 7,4 \cdot 10^{-3}}{0,63 \cdot 10^6 \cdot 1,2} = 1,958 \geq 1$$

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою ($\delta = 7,4$ мм):

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ст}} &= \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{max}}^p} = \frac{2 \cdot K_3 \cdot K_p \cdot E \cdot \left(\frac{\delta_{\text{сф}}}{R_{\text{сф}}}\right)^2}{P_{\text{max}}^p} = \\ &= \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 0,3 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{0,0074}{1,2}\right)^2}{0,63 \cdot 10^6} = 1,012 \geq 1 \end{aligned}$$

Отже, ми отримали працездатну оболонку, оскільки коефіцієнти запасу міцності та стійкості більші одиниці. Така конструкція не забезпечує критерій мінімуму маси, так як запас міцності майже в 2 рази перевищує запас стійкості. З цього можна зробити висновок про раціональність розрахунку підкріпленої оболонки.

Проектувальний розрахунок вафельного сферичного днища

Для сферичних оболонок можливе радіально-кільцеве, перехресне і тільки радіальне розміщення ребер. Експериментальною перевіркою встановлено, що чисельні варіанти слідує вважати рівноцінними по масі. Тож, для того, аби зменшити масу днища зробимо проектувальний розрахунок сферичного днища з перехресним розміщенням ребер (рис.4, б).

Розрахунок проводитимемо по алгоритму, представленому в [1].

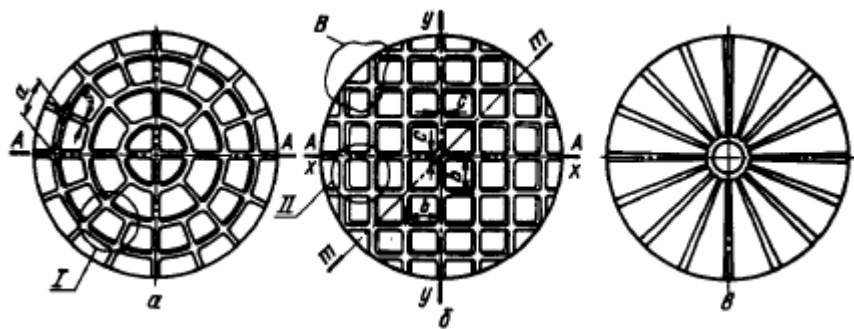


Рис.4

Різновид розміщення підкріплюючих ребер:

а) радіально-кільцеве; б) перехресне; в) радіальне

1. Розрахункове значення сили приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки.
2. Задаємо коефіцієнти ефективності конструкції (відношення товщини початкової товщини до товщини стінки): $\psi = 6$;

$$\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = \frac{0,55}{\sqrt{6}} = 0,225.$$

3. Розраховуємо число В, прийнявши коефіцієнт $k = 0,3$:

$$B = \frac{P_{кр} \cdot R^2}{k \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})}} = \frac{0,63 \cdot 10^6 \cdot 1,56^{\frac{3}{2}}}{0,3 \cdot 5,8 \cdot 10^{10}} = 8,811 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

4. Визначимо товщину стінки оболонки, враховуючи прийняті коефіцієнти:

$$\delta = \sqrt{\frac{B}{\left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2} \cdot (\psi^2 - 1)\right)}} = 4,367 \cdot 10^{-3}$$

Відповідно до технологічних вимог приймаємо: $\delta = 4,4 \text{ мм}$

5. Визначимо початкову товщину листа, та знайдемо висоту підсилюючих елементів:

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 4,4 \cdot 6 = 26,4 \text{ мм}$$
$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 26,4 - 4,4 = 22 \text{ мм}$$

6. Розрахуємо геометричні параметри підкріплень:
Визначаємо крок першого кільцевого ребра:

$$b = \frac{1,415 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{k_1 \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot \delta}{R \cdot P_{\text{max}}^p}} =$$
$$= \frac{1,415 \cdot 4,35 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 4,35 \cdot 10^{-3}}{1,56 \cdot 0,63 \cdot 10^6}} = 180,211 \text{ мм}$$

7. Далі розраховуємо ширину кожного кільцевого ребра:

$$c = \frac{\varphi \cdot b}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 180,211 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 6,44 \text{ мм}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо:

$$b = 180,25; \quad c = 6,45 \text{ мм.}$$

Тепер можемо визначити значення товщини еквівалентної гладкої стінки для порівняння масових характеристик та оцінки раціональності її використання.

$$\delta_{\text{екв}} = \delta + \frac{c \cdot h}{b} = 4,4 + \frac{6,4 \cdot 22}{180,25} = 5,962 \text{ мм}$$

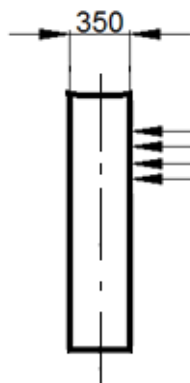
Приклад проектувального розрахунку магістрального трубопроводу

В даному баці розміщено магістральний трубопровід, що навантажений зовнішнім тиском та працює на стиснення. Імовірна втрата стійкості, тому потрібно провести розрахунок на міцність та на стійкість. Початкові данні: тиск надуву $P_n^e = 0,32 \text{ МПа}$, гідравлічний тиск $P_T^e = 0,05 \text{ МПа}$, діаметр магістрального трубопроводу 350 мм, температура в перерізі 1-1 дорівнює 150° С , а в перерізі 2-2 -50° С . Матеріал АМГ6М.

Приймаємо розрахункову схему, зображену на рис.6.

Розрахунок магістрального трубопроводу гладкої конструкції

Виходячи з геометрії баку визначимо висоту розрахункової циліндричної оболонки.



Висота циліндричної оболонки $L = 6,815 \text{ м}$.

Так як трубопровід проходить через весь бак розрахунок будемо проводити для 2-х перерізів.

Переріз 1-1 ($t = 150^\circ \text{ С}$)

Приймаємо розрахункове значення тиску:

$$\begin{aligned} P_{\max}^p &= (P_n^e + \Delta P) * f_p = \\ &= (0,32 + 0,004 + 0,1) * 1,5 = 0,63 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Рис.5

Розрахункова схема
магістрального
трубопроводу

Вирішуємо проектувальну задачу:

Розрахунок на міцність

Для циліндричної оболонки маємо відомі значення кільцевих та меридіональних напружень, які розраховуються за наступними формулами:

$$\sigma_\alpha = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \delta}; \quad \sigma_\beta = \frac{P \cdot R}{\delta}$$

Так як при розрахунках використовуємо безмоментну теорію оболонок та гіпотези Кірхгофа-Лява, то напруження по товщині

приймаються $\sigma_z = 0$. Отже, маємо плоский напружений стан і розрахунок будемо проводити за допомогою третьої теорії міцності:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} = \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R}{\delta}$$

Умовою міцності циліндричної оболонки буде:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p \leq \sigma_{0,2}$$

$$\frac{P_{\text{max}}^p \cdot R}{\delta} \leq \sigma_{0,2}$$

Тепер можемо розрахувати товщину:

$$\delta \geq \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R}{\sigma_{0,2(t=150^\circ)}}$$

Підставивши значення отримаємо товщину стінки:

$$\delta \geq \frac{0,63 \cdot 0,175}{200} = 5,512 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо $\delta = 1 \text{ мм}$.

Розрахунок на стійкість

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\text{max}}^p = (P_{\text{н}}^e + P_{\gamma}^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,05 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,63 \text{ МПа}$$

де ΔP - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

$$P_{\text{max}}^p \leq P_{\text{кр}}$$

Визначимо критичну величину тиску:

$$P_{\text{кр}} = K_p \cdot 0,92 \cdot \frac{E \cdot \delta^{\frac{5}{2}}}{L \cdot R^{\frac{3}{2}}}$$

Виходячи з умови стійкості та значенні критичного тиску можемо визначити необхідну товщину оболонки, коефіцієнти приймаємо $K_p = 0,8$:

$$\delta = \sqrt[5/2]{\frac{P_{\max}^p \cdot L \cdot R^{\frac{3}{2}}}{K_p \cdot 0,92 \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,63 \cdot 10^6 \cdot 6,815 \cdot 0,175^{\frac{3}{2}}}{0,8 \cdot 0,92 \cdot 5,8 \cdot 10^{10}}} = 8,848 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо: $\delta = 8,85 \text{ мм}$

Переріз 2-2 ($t = 50^\circ\text{C}$)

Приймаємо розрахункове значення тиску:

$$P_{\max}^p = (P_n^e + \Delta P) \cdot f_p =$$

$$= (0,32 + 0,004 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,705 \text{ МПа}$$

Вирішуємо проектувальну задачу:

Розрахунок на міцність

Для циліндричної оболонки маємо відомі значення кільцевих та меридіональних напружень, які розраховуються за наступними формулами:

$$\sigma_\alpha = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \delta}; \quad \sigma_\beta = \frac{P \cdot R}{\delta}$$

Так як при розрахунках використовуємо безмоментну теорію оболонок та гіпотези Кірхгофа-Лява, то напруження по товщині приймаються $\sigma_z = 0$. Отже, маємо плоский напружений стан і розрахунок будемо проводити за допомогою третьої теорії міцності:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{P_{\max}^p \cdot R}{\delta}$$

Умовою міцності циліндричної оболонки буде:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p \leq \sigma_{0,2}$$

$$\frac{P_{\max}^p \cdot R}{\delta} \leq \sigma_{0,2}$$

Тепер можемо розрахувати товщину:

$$\delta \geq \frac{P_{\max}^p \cdot R}{\sigma_{0,2(t=50^\circ\text{C})}}$$

Підставивши значення отримаємо товщину стінки:

$$\delta \geq \frac{0,705 \cdot 0,175}{230} = 5,364 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог прийmemo $\delta = 1 \text{ мм}$.

Розрахунок на стійкість

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\text{max}}^p = (P_n^e + P_\gamma^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,05 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,705 \text{ МПа}$$

де ΔP - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

$$P_{\text{max}}^p \leq P_{\text{кр}}$$

Визначимо критичну величину тиску:

$$P_{\text{кр}} = K_p \cdot 0,92 \cdot \frac{E \cdot \delta^{\frac{5}{2}}}{L \cdot R^{\frac{3}{2}}}$$

Виходячи з умови стійкості та значенні критичного тиску можемо визначити необхідну товщину оболонки, коефіцієнти приймаємо $K_p = 0,6$:

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt[2/5]{\frac{P_{\text{max}}^p \cdot L \cdot R^{\frac{3}{2}}}{K_p \cdot 0,92 \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})}}} = \\ &= \sqrt[2/5]{\frac{0,705 \cdot 10^6 \cdot 6,815 \cdot 0,175^{\frac{3}{2}}}{0,6 \cdot 0,92 \cdot 6,6 \cdot 10^{10}}} = 8,789 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

Відповідно до технологічних вимог прийmemo: $\delta = 8,8 \text{ мм}$

Висновки для магістрального трубопроводу з гладкою стінкою

Для забезпечення міцності та стійкості обираємо більше значення з двох отриманих товщин, тобто товщину в з розрахунку на стійкість.

Отже, остаточно приймаємо: $\delta = 8,85 \text{ мм}$

Проведемо перевірку працездатності такої оболонки, визначивши коефіцієнти запасу міцності та стійкості в критичних значеннях навантажень.

Перевірка роботоспроможності

Розрахуємо коефіцієнт запасу міцності за формулою ($\delta = 8,85$ мм):

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_p}$$

$$\text{Де } \sigma_p = \sigma_\beta = \frac{p_{\text{max}}^p \cdot R}{\delta}$$

В результаті отримаємо:

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0.2(t=150^\circ\text{C})} \cdot \delta}{p_{\text{max}}^p \cdot R} = \frac{200 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-3}}{0,63 \cdot 10^6 \cdot 0,175} = 16,054 \geq 1$$

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою ($\delta = 8,85$ мм):

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ст}} &= \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{max}}^p} = \frac{K_p \cdot 0,92 \cdot \frac{E_{(t=150^\circ\text{C})}}{L \cdot R^{\frac{3}{2}}}}{P_{\text{max}}^p} = \\ &= \frac{0,8 \cdot \frac{5,8 \cdot 10^{10} \cdot (8,85 \cdot 10^{-3})^{\frac{5}{2}}}{6,812 \cdot 0,175^{\frac{3}{2}}}}{0,63 \cdot 10^6} = 1,001 \geq 1 \end{aligned}$$

Отже, ми отримали працездатну оболонку, оскільки коефіцієнти запасу міцності та стійкості більші одиниці. Така конструкція не забезпечує критерій мінімуму маси, так як запас міцності в 16 раз перевищує запас стійкості. З цього можна зробити висновок про раціональність розрахунку підкріпленої оболонки.

Розрахунок магістрального трубопроводу підкріпленої в кільцевому напрямку конструкції

Вирішення проектувальної задачі проводиться по алгоритму, представленому в [1]. Всі розрахунки представлені нижче проведені в програмі MathCAD.

1. Розрахункове значення тиску приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки.
2. Задаємо коефіцієнт ефективності конструкції (відношення товщини початкової товщини до товщини стінки): $\psi = 6$.

3. Визначаємо коефіцієнт розподілення товщини: $\varphi = \frac{0,55}{\sqrt{\psi}} = \frac{0,55}{\sqrt{6}} = 0,225$;

4. Визначимо коефіцієнт β :

$$\beta = \frac{0,41}{\sqrt[3]{\varphi}} + \frac{1,85}{\sqrt[3]{\psi^2}} - 0,56 = 1,133$$

5. Розраховуємо товщину стінки, прийнявши коефіцієнти $k = 0,7$;

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{P_{\max}^p \cdot L \cdot R^{\frac{3}{2}}}{0,92 \cdot K_p \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot (1 + \beta \cdot \varphi (\psi - 1))^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{0,63 \cdot 10^6 \cdot 6.815 \cdot 0.175^{\frac{3}{2}}}{0,7 \cdot 0,92 \cdot 5.8 \cdot 10^{10} \cdot (1 + 1.133 \cdot 0.225 (6 - 1))^{\frac{5}{2}}} = \\ &= 3,141 \cdot 10^{-3} \text{ м}\end{aligned}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо: $\delta = 3,15 \text{ мм}$

6. Визначимо початкову товщину листа, та знайдемо висоту підсилюючих елементів:

$$\begin{aligned}\delta_{\text{поч}} &= \delta \cdot \psi = 3,15 \cdot 6 = 18,9 \text{ мм} \\ h &= \delta_{\text{поч}} - \delta = 18,9 - 3,15 = 15,75 \text{ мм}\end{aligned}$$

7. Розрахуємо геометричні параметри підкріплень:

Відстань між ребрами:

$$a = \frac{0,92 \cdot K_p \cdot R \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})}}{P_{\max}^p} \cdot \left(\frac{\delta}{R}\right)^{\frac{5}{2}} =$$

$$= \frac{0,92 \cdot 0,7 \cdot 0,175 \cdot 5,8 \cdot 10^{10}}{0,63 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{3,15 \cdot 10^{-3}}{0,175} \right)^{\frac{5}{2}} = 451,017 \text{ мм}$$

Товщина ребер:

$$c = \frac{\varphi \cdot a}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 451,017}{2 \cdot \pi} = 16,118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

Знайдемо кількість ребер, при цьому врахувавши довжину закінцівок:

$$L_{\text{зак}} = 7 \cdot 1,4 \cdot \delta_{\text{гл}} = 0,087 \text{ м}$$

Виходячи з цього знайдемо необхідну кількість підкріплень:

$$n = \frac{L - L_{\text{зак}}}{a} = \frac{6,815 - 0,087}{451,017 \cdot 10^{-3}} = 14,918$$

Округлимо кількість до цілого числа: $n = 15$ та перерахуємо параметр a та c :

$$a = \frac{L - L_{\text{зак}}}{n} = \frac{6,815 - 0,087}{15} = 448,551 \text{ мм}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо: $a = 448,6 \text{ мм}$.

Перерахуємо параметр c :

$$c = \frac{\varphi \cdot a}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 448,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 16,031 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо: $16,05 \text{ мм}$.

З проведеного розрахунку геометричних параметрів підкріпленої конструкції оболонки можна визначити еквівалентну товщину гладкої стінки для оцінки маси:

$$\delta_{\text{екв}} = \delta + \frac{c \cdot h}{a + c} = 3,15 + \frac{16,05 \cdot 15,75}{448,6 + 16,05} = 3,696 \text{ мм}$$

Висновки для магістрального трубопроводу вафельної конструкції

Отже, при використанні конструктивно-ортотропної оболонки трубопроводу бака ми отримали оболонку з еквівалентною товщиною значно меншою за товщину гладкого баку, що свідчить

про раціональність використання такої конструкції та виконання умови мінімуму маси.

Проведемо перевірку працездатності такої оболонки, визначивши коефіцієнт запасу стійкості в критичних значеннях навантажень.

Перевірка роботоспроможності:

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою:

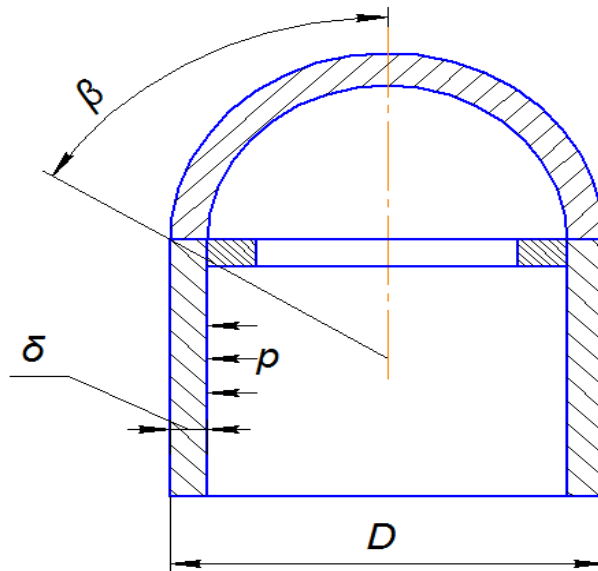
$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{max}}^P}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{кр}} &= 0,92 \cdot K_p \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \frac{\delta^{\frac{5}{2}}}{L \cdot R^{\frac{2}{3}}} \cdot (1 + \beta \cdot \varphi(\psi - 1))^{\frac{3}{2}} = \\ &= 0,7 \cdot 0,92 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \frac{3,15^{\frac{5}{2}}}{6,815 \cdot 0,175^{\frac{2}{3}}} \cdot (1 + 1,133 \cdot 0,225(6 - 1)^{\frac{5}{2}}) = \\ &= 0,634 \text{ МПа} \\ \eta_{\text{ст}} &= \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{max}}^P} = \frac{0,634}{0,63} = 1,007 \geq 1 \end{aligned}$$

Розрахунок шпангоутів.

Початкові данні: Матеріал АМГ6М. Радіус циліндра $R=1\text{м}$, радіус сфери $R_c = 1.25 R$, тиск надуву 0.29МПа , гідравлічний тиск в перерізі 1-1 дорівнює 0.003 МПа , температура 150°С , а в перерізі 2-2 дорівнює 0.06 МПа , температура 50°С , товщина 6.9 мм .

Переріз 1-1



1. Внутрішній розрахунковий тиск дорівнює:

$$P^P = f_p \times (P_c + P_n + \Delta P) = 1,5 \times (0,003 + 0,29 + 0,1) = 0,59 \text{ МПа}$$

2. Знаходимо коефіцієнт:

Приймаємо $k=0,6$

$$\begin{aligned} c &= 4 \times k \times \tan \beta \times \sqrt{\frac{\delta}{R}} \times \left(1 + \frac{0,353}{\sin^2 \beta}\right) \\ &= 4 \times 0,6 \times 1,2 \times \sqrt{\frac{0,0069}{1}} \times \left(1 + \frac{0,353}{0,591}\right) \\ &= 0,383 \end{aligned}$$

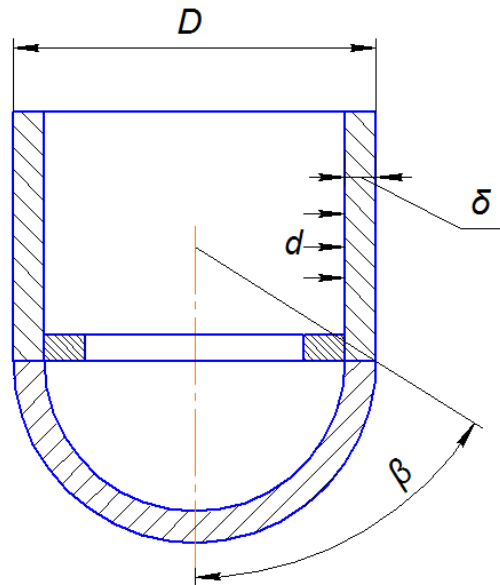
3. Знаходимо площу шпангоута

$$\begin{aligned} A_{un}^I &= \frac{P^P \times R^2}{2 \times \sigma_{0,2}^{150^\circ\text{C}} \times \text{tg} \beta} \times (1 - c) = \frac{0,59 \cdot 10^6 \times 1^2}{2 \times 130 \cdot 10^6 \times 1,2} \times (1 - 0,383) = \\ &= 11,617 \text{ см}^2 \end{aligned}$$

4. Визначаємо вагу шпангоута в **перерізі 1-1**

$$M_{\text{шп}} = A_{\text{шп}}^I \times 2 \times \pi \times R \times \gamma = 11,617 \times 10^{-4} \times 2 \times 3,14 \times 1 \times 2650 = 19,343 \text{ кг}$$

Переріз 2-2



1. Внутрішній розрахунковий тиск дорівнює:

$$P^P = f_p \times (P_e + P_n + \Delta P) = 1,5 \times (0,06 + 0,29 + 0,1) = 0,675 \text{ МПа}$$

2. Знаходимо коефіцієнт:

Приймаємо $k=0,6$

$$c = 4 \times k \times \tan \beta \times \sqrt{\frac{\delta}{R}} \times \left(1 + \frac{0,353}{\sin^2 \beta}\right) = 4 \times 0,6 \times 1,2 \times \sqrt{\frac{0,0069}{1}} \times \left(1 + \frac{0,353}{0,591}\right) = 0,383$$

3. Знаходимо площу шпангоута

$$A_{\text{шп}}^{\text{II}} = \frac{P^P \times R^2}{2 \times \sigma_{0,2}^{50^\circ\text{C}} \times \text{tg} \beta} \times (1 - c) = \frac{0,675 \cdot 10^6 \times 1^2}{2 \times 155 \cdot 10^6 \times 1,2} \times (1 - 0,383) = 11,156 \text{ см}^2$$

4. Визначаємо вагу шпангоута в **перерізі 2-2**

$$M_{\text{шп}} = A_{\text{шп}}^{\text{II}} \times 2 \times \pi \times R \times \gamma = 11,156 \times 10^{-4} \times 2 \times 3,14 \times 1 \times 2650 = 18,576 \text{ кг}$$

Довідкова інформація:

Таблиця рішень для тонких оболонок

Оболонки	Внутрішні зусилля та напруження	Перевірочна задача	Проектувальна задача	Визначення несучою спроможності
Сфера	$N_{\alpha} = \frac{PR_{sphere}}{2}$ $N_{\beta} = \frac{Psphere}{2}$ $\sigma_{\alpha} = \frac{PR_{sphere}}{2\delta}$ $\sigma_{\beta} = \frac{PR_{sphere}}{2\delta}$	$\sigma_{\text{эКВIII}} = \frac{P^p R_{sphere}}{2\delta}$ $\leq [\sigma]$	$\delta \geq \frac{P^p R_{sphere}}{2[\sigma]}$	$P^p \leq \frac{2\delta[\sigma]}{R_{sphere}}$
Циліндр	$N_{\alpha} = \frac{PR_{cylinder}}{2}$ $N_{\beta} = PR_{cylinder}$ $\sigma_{\alpha} = \frac{PR_{cylinder}}{2\delta}$ $\sigma_{\beta} = \frac{PR_{cylinder}}{\delta}$	$\sigma_{\text{эКВI}} = \sigma_{\text{max}} = \sigma_{\beta} = \frac{P_{\text{эКС}} f R_{cylinder}}{\delta}$ $\leq [\sigma]$	$\delta \geq \frac{P_{\text{эКС}} f R_{cylinder}}{[\sigma]}$	$P_{\text{эКС}} = \frac{\delta[\sigma]}{f R_{cylinder}}$
Конус	$N_{\alpha} = \frac{Pr}{2 \cos \varphi}$ $N_{\beta} = \frac{Pr}{\cos \varphi}$ $\sigma_{\alpha} = \frac{Pr}{2\delta \cos \varphi}$ $\sigma_{\beta} = \frac{Pr}{\delta \cos \varphi}$	$\sigma_{\text{эКВIII}} = \frac{PR}{\delta \cos \varphi}$ $\leq [\sigma]$	$\delta \geq \frac{PR}{[\sigma] \cos \varphi}$	$p^{max} = \frac{\delta[\sigma] \cos \varphi}{R}$
Тор	$N_{\alpha} = \frac{PR}{2} \left(\frac{2a + R \sin \alpha}{a + R \sin a} \right)$ $N_{\beta} = \frac{PR}{2}$ $\sigma_{\alpha} = \frac{PR}{2\delta} \left(\frac{2a + R \sin \alpha}{a + R \sin a} \right)$ $\sigma_{\beta} = \frac{PR}{\delta}$	$\sigma_{\text{эКВI}} = \sigma_{\text{эКВIII}} = \frac{PR}{2\delta} \left(\frac{2a - R}{a - R} \right)$ $\leq [\sigma]$	$\delta \geq \frac{P^3 f_p R}{2[\sigma]} \left(\frac{2a - R}{a - R} \right)$	$P_{\text{эКСП}} = \frac{2\delta[\sigma]}{f_p R} \left(\frac{a - R}{2a - R} \right)$

Втрата стійкості оболонок:

Навантаження- → Оболонка	Осьове стискання: (силою)	Зовнішній тиск: (стискання)
Циліндрична оболонка	$\sigma_{cr.} = K_R \times E \times \frac{\delta}{R}$ $T = 2 \times \pi \times K_R \times E \times \delta^2$ $K_R = \frac{1}{\pi} \times \sqrt[8]{\left(\frac{100 \times \delta}{R}\right)^3}$ Or $K_R = 0.605 \times K_c$ $K_c = 1 - 0.9(1 - e^{(-\frac{1}{16}\sqrt{\frac{R}{\delta}})})$	$P_{cr.} = K_c \times E \times 0.92 \times \left(\frac{R}{l}\right) \times \left(\frac{\delta}{R}\right)^{\frac{5}{2}}$ $K_c = 0.7 - 0.8$ $\sigma_{кр} = K_c \times E \times 0.92 \times \left(\frac{\delta}{l}\right) \times \sqrt{\frac{\delta}{R}}$
Конічна оболонка	$\sigma_{crynical} = K_R \times E \times \frac{\delta}{R} \cos \varphi$ Для приблизної оцінки: $K_R = \frac{1}{\pi} \times \sqrt[8]{\left(\frac{100 \times \delta}{R}\right)^3}$ or $K_R = 0.605 \times K_c$ $K_c = 1 - 0.9 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{16}\sqrt{\frac{R}{\delta}}\right)\right)$ $T_{кр} = 2 \times \pi \times K_R \times \delta^2 \times (\cos \varphi)^2$ Якщо кут нахилу твірної конуса лежить в діапазоні 0°-10°, тоді: $R_R = \frac{R + R_0}{2} \times \frac{1}{\cos \varphi}$ $\sigma_{crynical} = K_R \times E \times \frac{\delta}{R_R}$	$P_{cr.} = K_c \times E \times 0.92 \times \left(\frac{R}{l}\right) \times \left(\frac{\delta}{R}\right)^{\frac{5}{2}} \times (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}$ Якщо кут нахилу твірної конуса лежить в діапазоні 25°-70°, тоді: $P_{cr.} = K_c \times \rho \times E \times 0.92 \times \left(\frac{R}{l}\right) \times \left(\frac{\delta}{R}\right)^{\frac{5}{2}} \times (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}$ $\rho = 3.1 - 2.47 \times \frac{R_0}{R} \rightarrow 0 \leq \frac{R_0}{R} \leq 0.6$ $\rho = 2.66 - 1.74 \times \frac{R_0}{R} \rightarrow 0.65 \leq \frac{R_0}{R} \leq 1$ Якщо кут нахилу твірної конуса лежить в діапазоні 10°-25°, тоді: $P_{crynical} = K_c \times E \times 0.92 \times \left(\frac{R}{l}\right) \times \left(\frac{\delta}{R}\right)^{\frac{5}{2}} \times (\cos \varphi)^{\frac{3}{2}}$ Якщо кут нахилу твірної конуса лежить в діапазоні 0°-10°, тоді: $P_{cr.} = K_c \times E \times 0.92 \times \left(\frac{R^*}{R}\right) \times \left(\frac{\delta}{R^*}\right)^{\frac{5}{2}}$ $R^* = \frac{R_0 + R}{2}$
Сферична оболонка	-	$\sigma_{crynical} = K \times K_R \times E \times \frac{\delta}{R}$ $K_R = 0.605 \times K_c \quad K=0,5-0,7$ $K_c = 1 - 0.9 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{16}\sqrt{\frac{R}{\delta}}\right)\right)$ $P_{cr.} = 2 \times K \times K_R \times E \times \delta^2$

Рекомендована література

1. Проектування і конструкція ракет-носіїв /В.В. Близниченко, Є.О. Джур, Р.Д. Краснікова, Л.Д.Кучма, А.К. Линник та інш. - Д.: Вид-во ДНУ, 2007. – 504 с.
2. Балабух Л.И., Алфутон Н.А., Усюкин В.И. Строительная механика ракет М.: Высш. шк., 1984. – 391с.
3. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1985 – 343 с.
4. Прочность ракетных конструкций /В.И. Моссаковский, А.Г. Макаренков, П.И. Никитин и др. – М.: Высш. шк., 1990. – 359 с.
5. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах, том 1. Под ред. Биргера И.А., Пановко Я.Г. М.: Машиностроение, 1968 – 831 с.
6. Строительная механика ЛА /И.Ф. Образцов, Л.А. Булычев, В.В. Васильев и др. - М: Машиностроение, 1985 – 536 с.
7. Усюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. М.: Машиностроение, 1988 – 392 сзд-во МАИ, 1991. – 72 с.
8. Методичні вказівки до програми DRY BAY, скл. Краснікова Р. Д., Романюк В. М.