

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

**В.І. Ліповський**

**Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу**  
**«Будівельна механіка»**

Дніпро  
2019

## Анотація

В методичних вказівках розглянуто приклад розрахунку бака ракети носія. Всі рекомендації використані на базі рекомендованої літератури. В розглянутому курсовому проекті виконано розрахунок і проектування паливного бака окисника та сухого відсіку. Де які розрахунки виконані з помилками. Помилки не виправлені, а оставлені з ціллю самостійної перевірки студентами методики розрахунків, та виявлені помилок.

В роботі проведено декомпозицію конструкцій, визначення товщин отриманих примітивних оболонок та аналіз, при якому обирається та конструкція (гладка чи підкріплена), яка максимально забезпечує умову працездатності та критерій мінімальної маси.

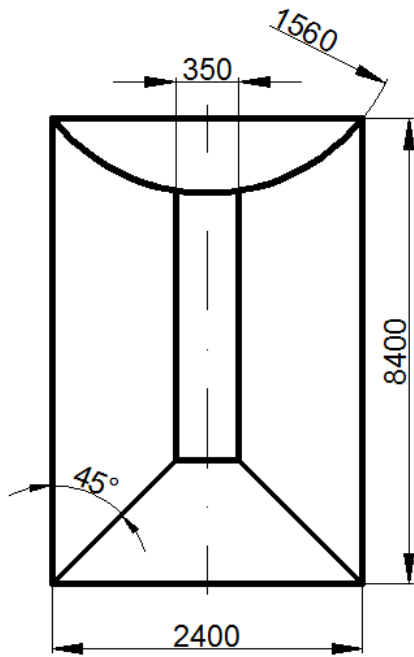
При розрахунках використовуються: гіпотези Кірхгофа-Лява, безмоментна теорія оболонок та третя теорія міцності.

Проектувальні розрахунки при роботі конструкції на міцність і стійкість проводяться в трьох моментах часу при польоті ЛА на активній ділянці траєкторії з урахуванням температурного впливу в процесі гарячого наддуву бака. Кожному моменту часу відповідають свої умови навантаження конструкції.

Зроблено висновки з обґрунтуванням доцільності та ефективності використання підкріпленої оболонки з точки зору мінімізації маси конструкції.

## Завдання

1. Виконати проектувальний розрахунок паливного бака I ступені:
  - 1) визначити геометричні параметри гладкої та вафельної стінки бака;
  - 2) дати оцінку обраного варіанту стінки (гладкої чи підкріпленої) з умови мінімальної ваги;
  - 3) визначити геометричні параметри верхнього та нижнього днищ баку;
  - 4) визначити площу та момент інерції верхнього та нижнього шпангоутів баку;
  - 5) для отриманих геометричних параметрів конструкції бака визначити загальну вагу конструкції.
2. Виконати проектувальний розрахунок сухого відсіку ЛА.



## 1. Вихідні дані для розрахунків

Вихідними даними для розрахунку є:

- 1) компоувальна схема баку;
- 2) таблиця навантажень при різних розрахункових випадках;
- 3) таблиця фізико-механічних властивостей матеріалів.

Геометричні параметри баку:

$$L=8.4 \text{ м} \quad D=2.4 \text{ м} \quad d=0.35 \text{ м} \quad R_{\text{сф}}=1,56 \text{ м}$$

Рис.1 ККС баку «О»

Таблиця навантажень

Розр. вип.	Розріз	$P_H^e$ , Мпа	$P_Y^e$ , Мпа	$T^e$ , $\text{Н} \cdot 10^4$	$M^e$ , $\text{Нм} \cdot 10^4$	$t$ , °С
I	1	0,32	0,004	75,1	-	150
	2		0,06	76,1	-	50
II	1	0,2	-	150	28,5	150
	2		0,02	161	27	50
III	1	0,18	-	544	-	150
	2		0,005	562	-	50
Верх. дн.	-	0,32	-	-	-	150
Ниж. дн.	-		0,05	-	-	50

Таблиця фізико-механічних властивостей матеріалів

Матеріал	Температура	50 °С	150 °С
	Мех. вл-ті		
АМг6М (Днища)	$\sigma_{\text{п}}$ , Мпа	115	100
	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	155	130
	$\sigma_B$ , Мпа	310	250
	$E$ , Мпа · 10 <sup>4</sup>	6,6	5,9
АМг6Н (Несуща оболонка)	$\sigma_{\text{п}}$ , Мпа	190	150
	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	230	200
	$\sigma_B$ , Мпа	370	280
	$E$ , Мпа · 10 <sup>4</sup>	6,6	5,8

## **2.Формулювання задачі, яку потрібно вирішити**

Літальний апарат повинен сприймати діючі на нього в процесі експлуатації навантаження без пошкоджень і недопустимих змін форми, тобто бути достатньо міцним та жорстким. Цій вимозі, що є необхідною умовою безпечної експлуатації, повинно задовольняти будь-яка інженерна споруда, а конструкція літального апарату повинна відрізнятися ще й мінімальною масою. Звісно, що вимога мінімальної маси знаходиться у протиріччі з вимогами достатньої міцності та стійкості. Тому вирішення даного протиріччя є однією із основних проблем, що стоїть при проектуванні літального апарата та його складових. Успішне вирішення проблеми визначається перш за все повнотою і достовірністю інформації, якою володіє конструктор, відносно взаємозв'язків між геометричними параметрами конструкції, властивостями матеріалу та допустимим рівнем її навантаження. Цей взаємозв'язок формується в процесі розрахунку на міцність літального апарату і його елементів, який передбачає визначення розрахункових навантажень; вибір розрахункових схем та моделей, що адекватно описують реальні елементи конструкції; аналіз напружено-деформованого стану, стійкості та оцінка роботоспроможності елементів.

Отже, потрібно провести розрахунок бака окисника як гладкої так і підкріпленої конструкції та обрати той варіант, який задовольняє умову мінімальної маси, а значить буде максимально ефективним при експлуатації ракети.

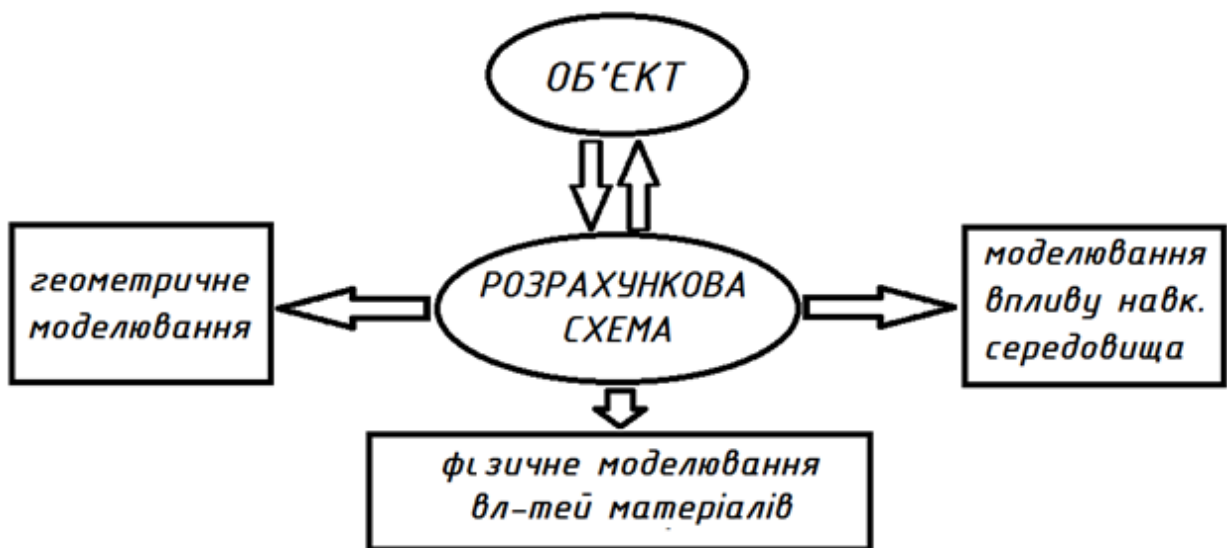
## Вибір методів для розрахунку

Сучасне інженерне проектування тісно пов'язане з використанням ЕОМ, які дозволяють реалізувати складні методи обчислення, такі як МКЕ, МГЕ, МКР. Такі методи дозволяють отримати високоточні результати.

В даній курсовій роботі обчислення проводиться за допомогою аналітичних методів розрахунку, які до сих пір мають важливе значення при ескізному проектуванні. По-перше, прості аналітичні рішення, що наглядно ілюструють вплив окремих параметрів конструкції, необхідні для правильного розуміння особливостей силової схеми конструкції ракети. По-друге, вміння користуватися простими методами розрахунку, які не вимагають складних програмних пакетів, з одного боку, проектувальнику не потрібно кожного разу звертатись за допомогою до потужних ЕОМ для отримання оперативного результату на початковій стадії проектування, а з іншого, допомагає контролювати і правильно пояснити результати перевірочних розрахунків.

### *Розрахункова схема та спрощення*

Щоб провести розрахунок конструкції, її необхідно схематизувати в виді простіших елементів – геометричних примітивів, для яких існують готові рішення. Прикладами таких примітивів є балка, кільце, пластина, оболонка і т.д. Умови роботи конструкції описуються з деяким наближенням: передбачається повна визначеність закріплення, геометричних розмірів, форми і властивостей матеріалів. Такий процес ідеалізації та спрощення називається вибором розрахункової схеми.



В курсі будівельна механіка ракет головними елементами вивчення є пластини, оболонки, кільця та стержні.

Пластина – це геометричне тіло, обмежене двома площинами, відстань між якими (товщина) значно менша розмірів в плані. Пластина називається пластиною, якщо відношення товщини до найменшого розміру в плані менше ніж 0,2.

Оболонка – це геометричне тіло, обмежене двома криволінійними поверхнями, відстань між якими (товщина) значно менша розмірів в плані. Пластина називається пластиною, якщо відношення товщини до найменшого розміру в плані менше ніж 0,2.

Стержень – це геометричне тіло, один з розмірів якого (довжина) значно перевищує два інших, що утворюють площину поперечного перетину.

При розгляданні об'єктів ЛА використовуються наступні допущення:

- 1) суцільності;
- 2) однорідності;
- 3) ізотропності;
- 4) лінійної пружності;
- 5) допущення про малі деформації.

Пластини та оболонки мають такі особливості, які можна представити в виді наступних закономірностей – гіпотез Кірхгофа-Лява:

1. Прямий нормальний відрізок серединної поверхні до навантажень і після залишається прямим і перпендикулярним до серединної поверхні.
2. Даний відрізок не змінює своєї довжини.
3. В пластині й оболонці діючі зусилля на шарах серединної поверхні малі і ними можна знехтувати.

### ***Безмоментна теорія оболонок***

На етапі ескізного проектування виконують два розрахунки: приблизний та уточнений. В приблизному розрахунку робиться допущення про те, що вся конструкція знаходиться в безмоментному напруженому стані з постійними по товщині напруженнями.

В нашому випадку розраховуються оболонки з осесиметричною геометрією та осесиметричним навантаженням. Для спрощення розрахунку

таких оболонки використовують безмоментну теорію, при використанні якої допускають, що напруження, які виникають в оболонці, постійні по товщині і, як наслідок, згин оболонки відсутній.

Потрібно відзначити, що чим менше відношення товщини оболонки до її радіусу, тим більш точно виконується допущення про постійність напружень по товщині і тим точніше виконуються розрахунки по безмоментній теорії.

В місцях закріплення оболонки чи їх з'єднання між собою за допомогою шпангоутів виникає зона крайового ефекту, на якій напруження нерівномірні та непостійні по товщині. Оскільки в даній конструкції використовуються пластичні матеріали, а саме сплави алюмінію АМгбН і АМгбМ, в яких моментний напружено-деформований стан швидко затухає, а довжини оболонки значно перевищують довжину крайового ефекту, його вплив ми не будемо враховувати.

Отже, всі послідовні розрахунки є наближеними і будуть проведені по безмоментній теорії оболонки без врахування впливу зони крайового ефекту.

### ***Розрахункові випадки та коефіцієнти безпеки***

Розрахунковий випадок окремого елемента конструкції називається така ситуація в умовах експлуатації, коли навантаження на елемент може досягати граничних значень.

В нашому завданні розглядається несучий бак ракети, що експлуатується на активній ділянці траєкторії. Виходячи з цього, при розрахунку паливного баку беремо до уваги три основних розрахункових випадки, для яких і будемо вирішувати проектувальну задачу:

- 1) Перший розрахунковий випадок відповідає найбільшому навантаженню внутрішнім тиском в баку перед стартом;
- 2) Другий розрахунковий випадок відповідає значенню найбільшого моменту, що діє на ЛА в зоні максимального швидкісного напору;
- 3) Третій розрахунковий випадок відповідає дії максимальної поздовжньої сили в зоні кінця активної ділянки траєкторії.

В кожному розрахунковому випадку також враховується нагрів елементів конструкції в результаті гарячого наддування баку.



При розрахунках використовуємо наступні коефіцієнти безпеки для визначення розрахункових значень навантажень:

- 1) Осьова стискаюча сила:  $T^p = T^e \cdot f_T$ ;
- 2) Згинаючі моменти:  $M^p = M^e \cdot f_M$ ;
- 3) Внутрішній тиск в баці:  $P^p = P^e \cdot f_P$ .

Згідно з нормами міцності приймаються наступні значення коефіцієнтів безпеки:

- 1) для стискаючих сил та згинальних моментів:

$$f_T = f_M = 1.3$$

- 2) для внутрішнього тиску:

$$f_P = 1.5$$

Вплив нагріву на конструкційний матеріал враховується в результаті зниження його механічних характеристик.

## 4.Проектувальний розрахунок баку

Для виконання проектувального розрахунку баку окисника, необхідно виконати декомпозицію баку, тобто розбити його на геометричні примітиви. В даній конструкції виділимо:

- 1) несуща циліндрична стінка баку;
- 2) сферичне ввігнуте верхнє днище (працює на стискання);
- 3) конічне нижнє днище (працює на стискання);
- 4) внутрішній магістральний трубопровід (працює на стискання).

Далі перейдемо до розрахунку кожного виділеного елемента конструкції.

### Проектувальний розрахунок несущої циліндричної стінки баку

Несуща циліндрична оболонка приймає на себе навантаження внутрішнім тиском в баці (тиск наддування та гідростатичний тиск компоненту) а також навантаження осьової сили та згинального моменту. Виходячи з цього розрахунок для несущої стінки проводиться по трьом розрахунковим випадкам і вибирається максимальна товщина стінки, оскільки конструкція з таким параметром буде роботоспроможною на всіх ділянках польоту ракети.

#### 4.1.1 Розрахунок гладкої оболонки

##### *Розрахунковий випадок I*

Приймаємо наступну розрахункову схему та будемо проводити розрахунок на міцність, оскільки оболонка розтягується від дії внутрішнього тиску (рис.2).

Проведемо розрахунок для кожного перерізу та виберемо більшу товщину.

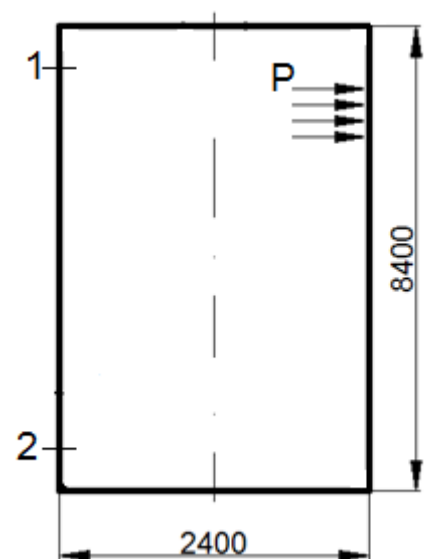


Рис.2

Розрахункова схема для РВІ

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

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

$$P_{\max}^p = (P_n^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,004 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,636 \text{ МПа}$$

де  $\Delta P$  - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Для циліндра 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 оболонки 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:

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

Умовою міцності циліндричної оболонки буде:

$$\sigma_{\text{екв III}}^p \leq \sigma_B$$

$$\frac{p_{\max}^p \cdot R_{\text{ц}}}{\delta} \leq \sigma_B$$

Тепер можемо розрахувати товщину:

$$\delta \geq \frac{P_{\max}^p \cdot R_{\text{ц}}}{\sigma_{B(t=150^{\circ})}}$$

Підставивши значення отримаємо товщину стінки:

$$\delta \geq \frac{0,63 \cdot 1,2}{280} = 2,726 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо значення товщини  $\delta = 2,75 \text{ мм}$

## Переріз 2-2 ( $t=50^{\circ}\text{C}$ )

Розрахунок оболонки для перерізу 2-2 виконується аналогічно.

Визначимо значення розрахункового тиску:

$$P_{\max}^p = (P_n^e + P_\gamma^e + \Delta P) \cdot f_p = (0,32 + 0,06 + 0,1) \cdot 1,5 = 0,72 \text{ МПа}$$

Та розрахуємо товщину оболонки з урахуванням зміни температури:

$$\delta \geq \frac{P_{\max}^p \cdot R_{\text{ц}}}{\sigma_{B(t=50^{\circ})}}$$

Отримаємо значення товщини:

$$\delta \geq \frac{0,72 \cdot 1,2}{370} = 2,335 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймемо значення товщини  $\delta = 2,35 \text{ мм}$

Для забезпечення міцності оболонки у першому розрахунковому випадку обираємо більше значення з двох отриманих товщин, тобто товщину в першому перерізі.

Отже, остаточно приймаємо для РВІ:

$$\delta = 2,75 \text{ мм}$$

## Розрахунковий випадок II

Розрахунок ведеться для випадку, коли оболонка навантажена найбільшим згинальним моментом, а значить працює на стійкість. Оскільки навантаження стискаючої осьової сили та моментів будуть компенсуватися дією внутрішнього тиску, необхідно визначити еквівалентну стискаючу силу (рис.3)

Проведемо розрахунок для кожного перерізу та виберемо більшу товщину.

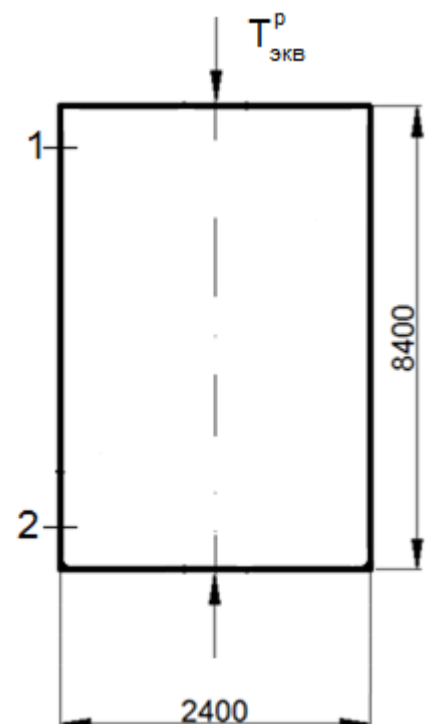


Рис.3  
Розрахункова схема для РВІ та РВІІ

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

Запишемо вираз для визначення еквівалентної осьової стискаючої сили:

$$T_{\text{екв}}^P = T^e f_T + \frac{2 \cdot M^e}{R_{\text{ц}}} \cdot f_M - \pi \cdot R_{\text{ц}}^2 \cdot (P_{\text{н}}^e + P_{\text{г}}^e - \Delta P) \cdot f_p$$

Підрахуємо значення еквівалентної сили для РВІІ:

$$\begin{aligned} T_{\text{екв}}^P &= 15 \cdot 10^5 \cdot 1,3 + \frac{2 \cdot 28,5 \cdot 10^4}{1,2} \cdot 1,3 - 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot (0,2 - 0,1) \cdot 10^6 \cdot 1,5 = \\ &= 1,889 \cdot 10^6 \text{ Н} \end{aligned}$$

Так як значення еквівалентної сили додатне, оболонка працює на стискання, а тому потрібно проводити розрахунок на стійкість і міцність.

### Проектувальний розрахунок на стійкість

Запишемо необхідну умову для стійкості конструкції:

$$T_{\text{кр}} = 2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot K_p \cdot \delta^2 \geq T_{\text{екв}}^P$$

Виходячи з умови стійкості конструкції можемо записати вираз для товщини оболонки:

$$\delta = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot K_p}}$$

Так як ми не знаємо коефіцієнт досконалості конструкції, розрахунок товщини проводимо ітераційним методом з поступовим уточненням, до тих пір, доки помилка коефіцієнтів не стане меншою за 1%.

У початковому наближенні приймаємо значення  $K_p^{(0)} = 0,18$ . Звідси визначимо товщину:

1) перша ітерація:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot K_p^{(0)}}} = \sqrt{\frac{1,889 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,18}} = 5,366 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2) друга ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(1)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_0}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 5,366 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,235$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(1)}}} = \sqrt{\frac{1,889 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,235}} = 4,693 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(1)} - K_p^{(0)}|}{K_p^{(1)}} \cdot 100 = 23,53 \%$$

3) третя ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(2)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_1}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 4,693 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,224$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(2)}}} = \sqrt{\frac{1,889 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,224}} = 4,812 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(2)} - K_p^{(1)}|}{K_p^{(2)}} \cdot 100 = 5,159 \%$$

4) четверта ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(3)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_2}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 4,812 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,226$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(3)}}} = \sqrt{\frac{1,889 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,226}} = 4,789 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(3)} - K_p^{(2)}|}{K_p^{(3)}} \cdot 100 = 0,939 \% \leq 1\%$$

Отже, остаточно приймаємо значення необхідної товщини стінки для виконання умови стійкості конструкції для першого перерізу  $\delta = 4,789 \text{ мм}$ .

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 4,8 \text{ мм}$

### ***Проектувальний розрахунок на міцність***

Запишемо умову міцності:

$$\sigma = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta} \leq [\sigma]$$

де  $[\sigma] = \sigma_{0,2(t=150^\circ\text{C})}$ , оскільки конструкція стискається.

Вирішимо проектувальну задачу відносно умови міцності:

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_{0,2(t=150^\circ\text{C})}}$$

Знайдемо значення необхідної товщини:

$$\delta = \frac{1,889 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 1,2 \cdot 130 \cdot 10^6} = 1,253 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 1,3 \text{ мм}$

## Переріз 2-2 ( $t=50^{\circ}\text{C}$ )

Запишемо вираз для визначення еквівалентної осьової стискаючої сили:

$$T_{\text{екв}}^P = T^e f_T + \frac{2 \cdot M^e}{R_{\text{ц}}} \cdot f_M - \pi \cdot R_{\text{ц}}^2 \cdot (P_{\text{н}}^e + P_{\gamma}^e - \Delta P) \cdot f_p$$

Підрахуємо значення еквівалентної сили для РВІІ:

$$T_{\text{екв}}^P = 16,1 \cdot 10^5 \cdot 1,3 + \frac{2 \cdot 27 \cdot 10^4}{1,2} \cdot 1,3 - 3,14 \cdot 1,2^2 \cdot (0,2 + 0,02 - 0,1) \cdot 10^6 \cdot 1,5 = 1,864 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Так як значення еквівалентної сили додатне, оболонка працює на стискання, а тому потрібно проводити розрахунок на стійкість і міцність, аналогічно тому, що проводився для перерізу 1-1.

### Проектувальний розрахунок на стійкість

Проведемо ітераційну процедуру та визначимо товщину оболонки.

У першому наближенні приймаємо значення  $K_p^{(0)} = 0,18$ . Звідси визначимо товщину:

1) перша ітерація:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot K_p^{(0)}}} = \sqrt{\frac{1,864 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,18}} = 4,997 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2) друга ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(1)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_0}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 4,997 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,229$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot K_p^{(1)}}} = \sqrt{\frac{1,864 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,229}} = 4,428 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$



Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(1)} - K_p^{(0)}|}{K_p^{(1)}} \cdot 100 = 21,457 \%$$

3) третя ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(2)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_1}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 4,428 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,219$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(2)}}} = \sqrt{\frac{1,864 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,219}} = 4,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(2)} - K_p^{(1)}|}{K_p^{(2)}} \cdot 100 = 2,383 \%$$

4) четверта ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(3)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_2}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 4,53 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,221$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(3)}}} = \sqrt{\frac{1,864 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,221}} = 4,511 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(3)} - K_p^{(2)}|}{K_p^{(3)}} \cdot 100 = 0,846 \% \leq 1\%$$

Отже, остаточно приймаємо значення необхідної товщини стінки для виконання умови стійкості конструкції для першого перерізу  $\delta = 4,511$  мм.

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 4,55$  мм

### **Проектувальний розрахунок на міцність**

Запишемо умову міцності:

$$\sigma = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta} \leq [\sigma]$$

де  $[\sigma] = \sigma_{0,2(t=50^\circ\text{C})}$ , оскільки конструкція стискається.

Вирішимо проектувальну задачу відносно умови міцності:

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_{0,2(t=50^\circ\text{C})}}$$

Знайдемо значення необхідної товщини:

$$\delta = \frac{1,864 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 1,2 \cdot 155 \cdot 10^6} = 1,075 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 1,1$  мм

### **Висновок для РВІІ**

Для забезпечення міцності та стійкості оболонки у другому розрахунковому випадку оберемо більше значення з чотирьох отриманих товщин, тобто товщину в першому перерізі з розрахунку на стійкість.

Отже, остаточно приймаємо для РВІІ:  $\delta = 4,8$  мм

### ***Розрахунковий випадок III***

Розрахунок ведеться для випадку, коли оболонка навантажена найбільшим значенням осьової стискаючої сили, а значить працює на стійкість. Оскільки навантаження стискаючої осьової сили та моментів будуть компенсуватися дією внутрішнього тиску, необхідно визначити еквівалентну стискаючу силу (рис.3). Розрахунок проводимо аналогічно розрахунку для РВІІ.

Проведемо розрахунок для кожного перерізу та оберемо більшу товщину.

#### ***Переріз 1-1 ( $t=150^{\circ}\text{C}$ )***

Запишемо вираз для визначення еквівалентної осьової стискаючої сили:

$$T_{\text{екв}}^P = T^e f_T + \frac{2 \cdot M^e}{R_{\text{ц}}} \cdot f_M - \pi \cdot R_{\text{ц}}^2 \cdot (P_{\text{н}}^e + P_{\text{г}}^e - \Delta P) \cdot f_p$$

Підрахуємо значення еквівалентної сили для РВІІ:

$$T_{\text{екв}}^P = 544 \cdot 10^4 \cdot 1,3 - \pi \cdot 1,2^2 \cdot (0,18 - 0,1) \cdot 10^6 \cdot 1,5 = 6,529 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Так як значення еквівалентної сили додатне, оболонка працює на стискання, а тому потрібно проводити розрахунок на стійкість і міцність.

#### ***Проектувальний розрахунок на стійкість***

Використовуємо умову стійкості та вираз для визначення товщини приведену для розрахунку в РВІ. Проведемо ітераційну процедуру з поступовим уточненням товщини доки помилка визначення коефіцієнту досконалості конструкції не стане меншою 1 %.

У початковому наближенні приймаємо значення  $K_p^{(0)} = 0,18$ . Звідси визначимо товщину:

1) перша ітерація:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot K_p^{(0)}}} = \sqrt{\frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,18}} = 9,977 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2) друга ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(1)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_0}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 9,977 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,297$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(1)}}} = \sqrt{\frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,297}} = 7,767 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(1)} - K_p^{(0)}|}{K_p^{(1)}} \cdot 100 = 39,397 \%$$

3) третя ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(2)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_1}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 7,767 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,27$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(2)}}} = \sqrt{\frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,27}} = 8,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(2)} - K_p^{(1)}|}{K_p^{(2)}} \cdot 100 = 9,845 \%$$

4) четверта ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(3)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_2}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 8,14 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,275$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(3)}}} = \sqrt{\frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,275}} = 8,069 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(3)} - K_p^{(2)}|}{K_p^{(3)}} \cdot 100 = 1,745 \%$$

5) п'ята ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(4)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_3}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 8,069 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,274$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(4)}}} = \sqrt{\frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,274}} = 8,082 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(4)} - K_p^{(3)}|}{K_p^{(4)}} \cdot 100 = 0,331 \% \leq 1\%$$

Отже, остаточно приймаємо значення необхідної товщини стінки для виконання умови стійкості конструкції для першого перерізу  $\delta = 8,082 \text{ мм}$ .

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 8,1 \text{ мм}$

### **Проектувальний розрахунок на міцність**

Запишемо умову міцності:

$$\sigma = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta} \leq [\sigma]$$

де  $[\sigma] = \sigma_{0,2(t=150^\circ\text{C})}$ , оскільки конструкція стискається.

Вирішимо проектувальну задачу відносно умови міцності:

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_{0,2}(t=150^\circ\text{C})}$$

Знайдемо значення необхідної товщини:

$$\delta = \frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 1,2 \cdot 5,8 \cdot 10^{10}} = 4,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 4,35 \text{ мм}$

### **Переріз 2-2 ( $t=50^\circ\text{C}$ )**

Запишемо вираз для визначення еквівалентної осьової стискаючої сили:

$$T_{\text{екв}}^P = T^e f_T + \frac{2 \cdot M^e}{R_{\text{ц}}} \cdot f_M - \pi \cdot R_{\text{ц}}^2 \cdot (P_{\text{н}}^e + P_{\text{г}}^e - \Delta P) \cdot f_p$$

Підрахуємо значення еквівалентної сили для РВІІ:

$$\begin{aligned} T_{\text{екв}}^P &= 562 \cdot 10^4 \cdot 1,3 - \pi \cdot 1,2^2 \cdot (0,18 + 0,005 - 0,1) \cdot 10^6 \cdot 1,5 = \\ &= 6,729 \cdot 10^6 \text{ Н} \end{aligned}$$

Так як значення еквівалентної сили додатне, оболонка працює на стискання, а тому потрібно проводити розрахунок на стійкість і міцність, аналогічно тому, що проводився для перерізу 1-1.

### **Проектувальний розрахунок на стійкість**

Проведемо ітераційну процедуру та визначимо товщину оболонки.

У першому наближенні приймаємо значення  $K_p^{(0)} = 0,18$ . Звідси визначимо товщину:

1) перша ітерація:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(0)}}} = \sqrt{\frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,18}} = 9,495 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2) друга ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(1)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_0}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 9,495 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,292$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{T_{\text{ЕКВ}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(1)}}} = \sqrt{\frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,292}} = 7,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(1)} - K_p^{(0)}|}{K_p^{(1)}} \cdot 100 = 38,261 \%$$

3) третя ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(2)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_1}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 7,46 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,266$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{T_{\text{ЕКВ}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(2)}}} = \sqrt{\frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,266}} = 7,805 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(2)} - K_p^{(1)}|}{K_p^{(2)}} \cdot 100 = 9,464 \%$$

4) четверта ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(3)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_2}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 7,805 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,271$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(3)}}} = \sqrt{\frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,271}} = 7,74 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(3)} - K_p^{(2)}|}{K_p^{(3)}} \cdot 100 = 1,681 \%$$

5) п'ята ітерація:

Визначимо значення коефіцієнту:

$$K_p^{(4)} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot \delta_3}{R}\right)^3} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{100 \cdot 7,74 \cdot 10^{-3}}{1,2}\right)^3} = 0,27$$

Тоді отримаємо значення товщини:

$$\delta_4 = \sqrt{\frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=50^\circ\text{C})} \cdot K_p^{(4)}}} = \sqrt{\frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 0,27}} = 7,752 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначимо помилку коефіцієнтів:

$$\frac{|K_p^{(4)} - K_p^{(3)}|}{K_p^{(4)}} \cdot 100 = 0,318 \% \leq 1\%$$

Отже, остаточно приймаємо значення необхідної товщини стінки для виконання умови стійкості конструкції для першого перерізу  $\delta = 7,752 \text{ мм}$ .

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 7,8 \text{ мм}$



### **Проектувальний розрахунок на міцність**

Запишемо умову міцності:

$$\sigma = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta} \leq [\sigma]$$

де  $[\sigma] = \sigma_{0,2(t=50^\circ\text{C})}$ , оскільки конструкція стискається.

Вирішимо проектувальну задачу відносно умови міцності:

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_{0,2(t=50^\circ\text{C})}}$$

Знайдемо значення необхідної товщини:

$$\delta = \frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 1,2 \cdot 155 \cdot 10^6} = 3,88 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

З урахуванням технологічних вимог  $\delta = 3,9 \text{ мм}$

### **Висновок для РВІІІ**

Для забезпечення міцності та стійкості оболонки у третьому розрахунковому випадку оберемо більше значення з чотирьох отриманих товщин, тобто товщину в першому перерізі з розрахунку на стійкість.

Отже, остаточно приймаємо для РВІІ:  $\delta = 8,1 \text{ мм}$

### **Висновки для несущої оболонки гладкої конструкції**

Таблиця результатів розрахунків

РВ	Пер. 1-1 міцн.	Пер. 2-2 міцн.	Пер. 1-1 стій.	Пер. 2-2 стій.
РВІ	2,75 мм	2,35 мм	—	—
РВІІ	1,3 мм	1,1 мм	4,8 мм	4,55 мм
РВІІІ	4,35 мм	3,9 мм	<b>8,1 мм</b>	7,8 мм

Отже, з розрахунку на міцність і стійкість обираємо найбільше значення товщини, а саме товщину, обрану при розрахунках для РВІІІ. Проведемо перевірку працездатності такої оболонки, визначивши

коефіцієнти запасу міцності та стійкості такої оболонки в критичних значеннях навантажень.

### *Перевірка роботоспроможності*

Розрахуємо коефіцієнт запасу міцності за формулою ( $\delta = 8,1$  мм):

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_p}$$

$$\text{Де } \sigma_p = \sigma_\beta = \frac{P_{\text{max}} \cdot R}{\delta}$$

В результаті отримаємо:

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{\sigma_{B(t=150^\circ\text{C})} \cdot \delta}{P_{\text{max}} \cdot R} = \frac{280 \cdot 10^6 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}}{0,705 \cdot 10^6 \cdot 1,2} = 2,972 \geq 1$$

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою ( $\delta = 8,1$  мм):

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{кр}}}{T_{\text{екв}}^P(\text{max})}$$

$$\text{Де } T_{\text{кр}} = 2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p \cdot \delta^2$$

$T_{\text{екв}}^P(\text{max})$  та  $K_p$  беремо з РВІІІ (розріз 1-1)

В результаті отримаємо:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{міц}} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot K_p \cdot \delta^2}{T_{\text{екв}}^P(\text{max})} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,27 \cdot (8,1 \cdot 10^{-3})^2}{6,529 \cdot 10^6} = \\ &= \frac{6,558 \cdot 10^6}{6,529 \cdot 10^6} = 1,004 \geq 1 \end{aligned}$$

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 3 рази перевищує запас стійкості. З цього можна зробити висновок про раціональність розрахунку підкріпленої оболонки.

#### 4.1.2 Розрахунок підкріпленої циліндричної несущої оболонки (вафельної)

Під вафельними оболонками розуміють конструктивно-ортотропні оболонки з часто розміщеними підсилюючим набором, виготовленим разом зі стінкою. Спостерігається загальна втрата стійкості – вигинання стінки разом з підсилюючими ребрами і місцеве вигинання стінки, обмеженої ребрами.

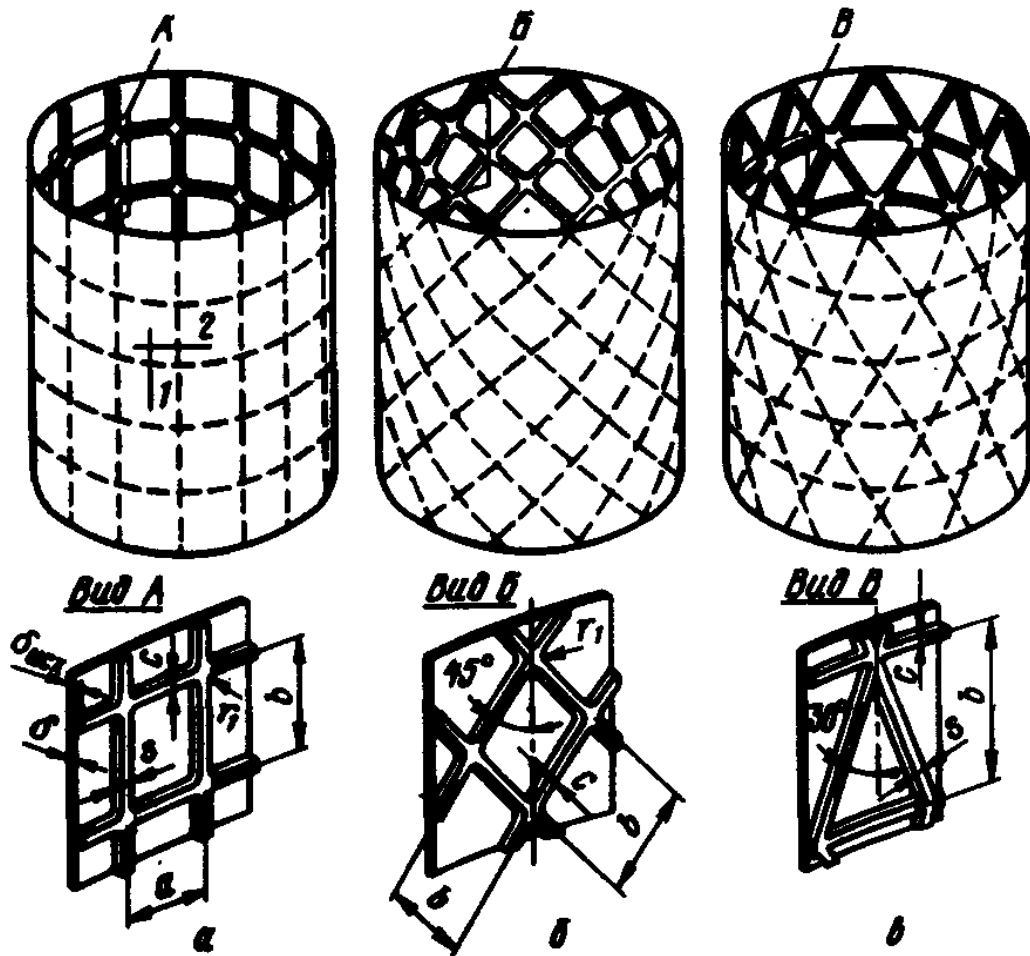


Рис.4 Вафельні оболонки з розміщенням ребер:

а) повздовжньо-кільцевим; б) перехресним; в) перехресно-кільцевим

На практиці найбільше поширення отримали оболонки з подовжньо-кільцевими ребрами, найбільш прийнятні в технологічному сенсі. В загальному випадку вафельний сегмент характеризується шістьма геометричними параметрами

- 1) товщина полотна —  $\delta$ ;
- 2) висота ребра —  $h$  або початкова товщина —  $\delta_{\text{исх}} = h + \delta$ ;

- 3) ширина стрингера —  $s$ ;
- 4) ширина шпангоута —  $c$ ;
- 5) відстань між стрингерами —  $a$ ;
- 6) відстань між шпангоутами —  $b$ .

Втрата стійкості вафельної оболонки може відбуватися по декількох видах, а саме:

1. Загальна втрата стійкості.

Стійкість втрачається із захопленням декількох сегментів. В залежності від геометрії оболонки і її параметрів можлива:

- осесиметрична:

$$\sigma_{кр} = K_c \sqrt{\frac{4 \cdot D_c \cdot E \cdot \delta_{ш}}{R^2 \cdot \delta_c^2}};$$

$$T_{кр} = 4 \cdot K_c \cdot \pi \cdot \sqrt{E \cdot D_c \cdot \delta_{ш}};$$

- несиметрична відносно осі:

$$\sigma_{кр} = K_c \sqrt{\frac{4 \cdot D_{ш} \cdot E}{R^2 \cdot \delta_c}};$$

$$T_{кр} = 4 \cdot K_c \cdot \pi \cdot \sqrt{E \cdot D_{ш} \cdot \delta_c};$$

2. Місцева втрата стійкості для обшивки.

Відбувається між ребрами в окремій клітині. Для обшивки в якості розрахункової схеми, можна прийняти схему стислої пластини.

$$\sigma_{крп}^M = K_p \cdot E \cdot \left(\frac{\delta}{a}\right)^2$$

3. Місцева втрата стійкості стрингера, як пластини. Цей вид втрати стійкості може виникати при високих ребрах(стрингерах).

$$\sigma_{крс}^M = K_p \cdot E \cdot \left(\frac{S}{h}\right)^2$$

Для визначення масової ефективності використовуватимемо поняття еквівалентної товщини, яка отримується при рівномірному розподілі ребер по поверхні оболонки.

## Проектувальний розрахунок для вафельної конструкції несущої циліндричної частини

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

Розрахунок для вафельної оболонки проводимо для тих розрахункових випадків, коли оболонка стискається під дією осьової сили та згинальних моментів і еквівалентне значення осьової сили додатне, тобто оболонка стискається. Тож розрахунок проводимо для РВІІ та РВІІІ.

### Вирішимо проектувальну задачу для РВІІ

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

1. Розрахункове значення еквівалентної сили приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки для РВІІ перерізу 1-1.
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. Визначимо товщину стінки оболонки, враховуючи прийняті коефіцієнти та задавши значення недосконалості конструкції

$$K = 0,28$$

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2} \cdot (\psi^2 - 1)\right)} = \frac{1,889 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,225^2} \cdot (6^2 - 1)\right)} = 2,002 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо значення товщини

$$\delta = 2,05 \text{ мм}$$

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

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 2,05 \cdot 6 = 12,3 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 12,3 - 2,05 = 10,25 \text{ мм}$$

7. Розрахуємо еквівалентну товщину гладкого сегменту для прийнятих коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{екв}} &= \delta \cdot (1 + 0,16 \cdot \varphi_1 \cdot (\psi - 1)) = \\ &= 2,05 \cdot (1 + 0,16 \cdot 0,225 \cdot (6 - 1)) = 2,418 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

8. Тепер можемо розрахувати геометричні параметри сегменту вафельної оболонки:

$$\begin{aligned} a &= \frac{2,5 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{K_{\sigma} \cdot R \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})} \cdot \delta_{\text{екв}}}{T_{\text{екв}}^P}} = \\ &= \frac{2,5 \cdot 2,05 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 1,2 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 2,418 \cdot 10^{-3}}{1,889 \cdot 10^6}} = 122,891 \text{ мм} \end{aligned}$$

Приймаємо за основу квадратний сегмент, тому  $b = a = 122,891 \text{ мм}$ .

Знаходимо товщину підсилюючих елементів:

$$s = \frac{\varphi_1 \cdot a}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 122,891 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 4,392 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = \frac{\varphi_2 \cdot b}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 122,891 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 4,392 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймаємо:

$$s = 4,4 \text{ мм}; c = 4,4 \text{ мм}.$$

9. Розрахуємо кількість кільцевих та повздовжніх елементів:

$$n_{\text{стр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{s + a} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{(4,4 + 122,891) \cdot 10^{-3}} = 59,233$$

$$n_{\text{шп}} = \frac{L}{c + b} = \frac{8,4}{(4,4 + 122,891) \cdot 10^{-3}} = 65,99$$

Округлимо отримані результати до цілих:  $n_{\text{стр}} = 60$ ;  $n_{\text{шп}} = 66$ .

10. Знаючи кількість елементів, можемо перерахувати значення  $a$  та  $b$ :

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n_{\text{стр}}} - s = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{60} - 4,4 \cdot 10^{-3} = 121,264 \text{ мм}$$

$$b = \frac{L}{n_{\text{шп}}} - c = \frac{8,4}{66} - 4,4 \cdot 10^{-3} = 122,873 \text{ мм}$$

Згідно з технологічними вимогами приймемо наступні значення:

$$a = 121,3 \text{ мм}; b = 122,9 \text{ мм}$$

11. Визначимо значення еквівалентної товщини для гладкої оболонки відповідно до прийнятих параметрів конструкції:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{екв}} &= \delta + \frac{s \cdot h}{a} + \frac{c \cdot h}{b} + \frac{s \cdot c \cdot h}{a \cdot b} = \\ &= \left( 2,05 + \frac{4,4 \cdot 10,25}{122,9} + \frac{4,4 \cdot 10,25}{121,3} + \frac{4,4 \cdot 4,4 \cdot 10,25}{122,9 \cdot 121,3} \right) \cdot 10^{-3} = 2,802 \text{ мм} \end{aligned}$$

Остаточно приймаємо значення еквівалентної товщини для подальшого порівняння  $\delta_{\text{екв}} = 2,802 \text{ мм}$ .

### **Переріз 2-2 ( $t=50^{\circ}\text{C}$ )**

1. Розрахункове значення еквівалентної сили приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки для РВП перерізу 2-2.

2. Коефіцієнти, що прийняті для перерізу 1-1 будемо приймати для подальшого розрахунку, а саме  $\psi = 6, \varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = 0,225$ ;

3. Визначимо товщину стінки оболонки, враховуючи прийняті коефіцієнти та задавши значення недосконалості конструкції

$$k = 0,28$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot \left( 1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2 \cdot (\psi^2 - 1)} \right)} = \\ &= \frac{1,864 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot \left( 1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,225^2 \cdot (6^2 - 1)} \right)} = 1,864 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо значення товщини

$$\delta = 1,9 \text{ мм}$$

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

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 1,9 \cdot 6 = 11,4 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 11,4 - 1,9 = 9,5 \text{ мм}$$

5. Розрахуємо еквівалентну товщину гладкого сегменту для прийнятих коефіцієнтів:

$$\delta_{\text{екв}} = \delta \cdot (1 + 0,16 \cdot \varphi_1 \cdot (\psi - 1)) =$$

$$= 1,9 \cdot (1 + 0,16 \cdot 0,225 \cdot (6 - 1)) = 2,241 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

6. Тепер можемо розрахувати геометричні параметри сегменту вафельної оболонки:

$$a = \frac{2,5 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{K_{\sigma} \cdot R \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot \delta_{\text{екв}}}{T_{\text{екв}}^p}} =$$

$$= \frac{2,5 \cdot 1,9 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 1,2 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 2,241 \cdot 10^{-3}}{1,864 \cdot 10^6}} = 117,76 \text{ мм}$$

Приймаємо за основу квадратний сегмент, тому  $b = a = 117,76 \text{ мм}$ .

Знаходимо товщину підсилюючих елементів:

$$s = \frac{\varphi_1 \cdot a}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 117,76 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 4,208 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = \frac{\varphi_2 \cdot b}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 117,76 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 4,208 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймаємо:  $s = 4,25 \text{ мм}$ ;

$c = 4,25 \text{ мм}$ .

7. Розрахуємо кількість кільцевих та повздовжніх елементів:

$$n_{\text{стр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{s + a} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{(4,25 + 117,76) \cdot 10^{-3}} = 61,797$$

$$n_{\text{шп}} = \frac{L}{c + b} = \frac{8,4}{(4,25 + 117,76) \cdot 10^{-3}} = 68,847$$



Округлимо отримані результати до цілих:  $n_{\text{стр}} = 62$ ;  $n_{\text{шп}} = 69$ .

8. Знаючи кількість елементів, можемо перерахувати значення  $a$  та  $b$ :

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n_{\text{стр}}} - s = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{62} - 4,25 \cdot 10^{-3} = 117,36 \text{ мм}$$

$$b = \frac{L}{n_{\text{шп}}} - c = \frac{8,4}{69} - 4,25 \cdot 10^{-3} = 117,489 \text{ мм}$$

Згідно з технологічними вимогами приймемо наступні значення:

$$a = 117,4 \text{ мм}; b = 117,5 \text{ мм}$$

9. Визначимо значення еквівалентної товщини для гладкої оболонки відповідно до прийнятих параметрів конструкції:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{екв}} &= \delta + \frac{s \cdot h}{a} + \frac{c \cdot h}{b} + \frac{s \cdot c \cdot h}{a \cdot b} = \\ &= \left( 1,9 + \frac{4,25 \cdot 9,5}{117,4} + \frac{4,25 \cdot 9,5}{117,5} + \frac{4,25 \cdot 4,25 \cdot 9,5}{117,4 \cdot 117,5} \right) \cdot 10^{-3} = \\ &= 2,6 \text{ мм} \end{aligned}$$

Остаточно приймаємо значення еквівалентної товщини для перерізу 2-2:  $\delta_{\text{екв}} = 2,6 \text{ мм}$ .

### **Висновок для РВІІ**

Для забезпечення міцності та стійкості оболонки у другому розрахунковому випадку обираємо більше значення з двох отриманих еквівалентних товщин, тобто товщину в першому перерізі.

Отже, остаточно приймаємо для РВІІ:  $\delta_{\text{екв}} = 2,802 \text{ мм}$

### **Вирішимо проектувальну задачу для РВІІІ**

#### **Переріз 1-1 ( $t=150^{\circ}\text{C}$ )**

1. Розрахункове значення еквівалентної сили приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки для РВІІІ перерізу 1-1.
2. Коефіцієнти, що прийняті для попереднього розрахунку будемо приймати для подальшого розрахунку, а саме  $\psi = 6, \varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = 0,225$ ;

3. Визначимо товщину стінки оболонки, враховуючи прийняті коефіцієнти та задавши значення недосконалості конструкції

$$K = 0,28$$

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2} \cdot (\psi^2 - 1)\right)} =$$

$$= \frac{6,529 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,225^2} \cdot (6^2 - 1)\right)} = 3,721 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо значення товщини

$$\delta = 3,75 \text{ мм}$$

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

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 3,75 \cdot 6 = 22,5 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 22,5 - 3,75 = 18,75 \text{ мм}$$

5. Розрахуємо еквівалентну товщину гладкого сегменту для прийнятих коефіцієнтів:

$$\delta_{\text{екв}} = \delta \cdot \left(1 + 0,16 \cdot \varphi_1 \cdot (\psi - 1)\right) =$$

$$= 3,75 \cdot \left(1 + 0,16 \cdot 0,225 \cdot (6 - 1)\right) = 4,424 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

6. Тепер можемо розрахувати геометричні параметри сегменту вафельної оболонки:

$$a = \frac{2,5 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{K_\sigma \cdot R \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot \delta_{\text{екв}}}{T_{\text{екв}}^P}} =$$

$$= \frac{2,5 \cdot 3,75 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 1,2 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 4,424 \cdot 10^{-3}}{6,529 \cdot 10^6}} = 163,537 \text{ мм}$$

Приймаємо за основу квадратний сегмент, тому  $b = a = 163,537 \text{ мм}$ .

Знаходимо товщину підсилюючих елементів:

$$s = \frac{\varphi_1 \cdot a}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 163,537 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 5,844 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = \frac{\varphi_2 \cdot b}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 163,537 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 5,844 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймаємо:  $s = 5,85 \text{ мм}$ ;  
 $c = 5,85 \text{ мм}$ .

7. Розрахуємо кількість кільцевих та повздожніх елементів:

$$n_{\text{стр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{s + a} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{(5,85 + 163,537) \cdot 10^{-3}} = 44,512$$

$$n_{\text{шп}} = \frac{L}{c + b} = \frac{8,4}{(5,85 + 163,537) \cdot 10^{-3}} = 49,591$$

Округлимо отримані результати до цілих:  $n_{\text{стр}} = 45$ ;  $n_{\text{шп}} = 50$ .

8. Знаючи кількість елементів, можемо перерахувати значення  $a$  та  $b$ :

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n_{\text{стр}}} - s = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{45} - 5,85 \cdot 10^{-3} = 161,702 \text{ мм}$$

$$b = \frac{L}{n_{\text{шп}}} - c = \frac{8,4}{50} - 5,85 \cdot 10^{-3} = 162,15 \text{ мм}$$

Згідно з технологічними вимогами приймемо наступні значення:

$$a = 161,75 \text{ мм}; b = 162,15 \text{ мм}$$

9. Визначимо значення еквівалентної товщини для гладкої оболонки відповідно до прийнятих параметрів конструкції:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{екв}} &= \delta + \frac{s \cdot h}{a} + \frac{c \cdot h}{b} + \frac{s \cdot c \cdot h}{a \cdot b} = \\ &= \left( 3,75 + \frac{5,85 \cdot 18,75}{161,75} + \frac{5,85 \cdot 18,75}{162,15} + \frac{5,85 \cdot 5,85 \cdot 18,75}{161,75 \cdot 162,15} \right) \cdot 10^{-3} = 5,129 \text{ мм} \end{aligned}$$

Остаточно приймаємо значення еквівалентної товщини для подальшого порівняння  $\delta_{\text{екв}} = 5,129 \text{ мм}$ .

### Переріз 2-2 ( $t=50^{\circ}\text{C}$ )

1. Розрахункове значення еквівалентної сили приймаємо з розрахунку на стійкість гладкої оболонки для РВШ перерізу 2-2.
2. Коефіцієнти, що прийняті для перерізу 1-1 будемо приймати для подальшого розрахунку, а саме  $\psi = 6, \varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = 0,225$ ;
3. Визначимо товщину стінки оболонки, враховуючи прийняті коефіцієнти та задавши значення недосконалої конструкції

$$K = 0,28$$

$$\delta = \frac{T_{\text{екв}}^P}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2} \cdot (\psi^2 - 1)\right)} =$$
$$= \frac{6,729 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 0,28 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,225^2} \cdot (6^2 - 1)\right)} = 3,542 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Згідно з технологічними вимогами приймаємо значення товщини

$$\delta = 3,55 \text{ мм}$$

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

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 3,55 \cdot 6 = 21,3 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 21,3 - 3,55 = 17,75 \text{ мм}$$

5. Розрахуємо еквівалентну товщину гладкого сегменту для прийнятих коефіцієнтів:

$$\delta_{\text{екв}} = \delta \cdot \left(1 + 0,16 \cdot \varphi_1 \cdot (\psi - 1)\right) =$$

$$= 3,55 \cdot \left(1 + 0,16 \cdot 0,225 \cdot (6 - 1)\right) = 4,188 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

6. Тепер можемо розрахувати геометричні параметри сегменту вафельної оболонки:

$$a = \frac{2,5 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{K_{\sigma} \cdot R \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot \delta_{\text{екв}}}{T_{\text{екв}}^P}} =$$

$$= \frac{2,5 \cdot 3,55 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 1,2 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 4,188 \cdot 10^{-3}}{6,729 \cdot 10^6}} = 158,276 \text{ мм}$$

Приймаємо за основу квадратний сегмент, тому  $b = a = 158,276 \text{ мм}$ .

Знаходимо товщину підсилюючих елементів:

$$s = \frac{\varphi_1 \cdot a}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 158,276 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 5,656 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = \frac{\varphi_2 \cdot b}{2 \cdot \pi} = \frac{0,225 \cdot 158,276 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 5,656 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Відповідно до технологічних вимог приймаємо:  $s = 5,7 \text{ мм}$ ;

$c = 5,7 \text{ мм}$ .

7. Розрахуємо кількість кільцевих та повздожніх елементів:

$$n_{\text{стр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{s + a} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{(5,7 + 158,276) \cdot 10^{-3}} = 45,981$$

$$n_{\text{шп}} = \frac{L}{c + b} = \frac{8,4}{(5,7 + 158,276) \cdot 10^{-3}} = 51,227$$

Округлимо отримані результати до цілих:  $n_{\text{стр}} = 46$ ;  $n_{\text{шп}} = 52$ .

8. Знаючи кількість елементів, можемо перерахувати значення  $a$  та  $b$ :

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n_{\text{стр}}} - s = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,2}{46} - 5,7 \cdot 10^{-3} = 158,209 \text{ мм}$$

$$b = \frac{L}{n_{\text{шп}}} - c = \frac{8,4}{52} - 5,7 \cdot 10^{-3} = 155,838 \text{ мм}$$

Згідно з технологічними вимогами приймемо наступні значення:

$$a = 158,25; b = 155,85 \text{ мм}$$

9. Визначимо значення еквівалентної товщини для гладкої оболонки відповідно до прийнятих параметрів конструкції:

$$\delta_{\text{екв}} = \delta + \frac{s \cdot h}{a} + \frac{c \cdot h}{b} + \frac{s \cdot c \cdot h}{a \cdot b} =$$

$$= \left( 2,05 + \frac{5,7 \cdot 17,75}{158,25} + \frac{5,7 \cdot 17,75}{155,85} + \frac{5,7 \cdot 5,7 \cdot 17,75}{158,25 \cdot 155,85} \right) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 4,862 \text{ мм}$$

Остаточно приймаємо значення еквівалентної товщини для перерізу 2-2:  $\delta_{\text{екв}} = 4,862 \text{ мм}$ .

### ***Висновок для РВІІІ***

Для забезпечення міцності та стійкості оболонки у третьому розрахунковому випадку обираємо більше значення з двох отриманих еквівалентних товщин, тобто товщину в першому перерізі.

Отже, остаточно приймаємо для РВІІІ:  $\delta_{\text{екв}} = 5,129 \text{ мм}$ .

### ***Висновки для несущої оболонки вафельної конструкції***

Отже, з проведених розрахунків обираємо конструкцію з найбільшим значенням еквівалентної товщини, а саме обрану при розрахунках для РВІІІ. Маємо такі геометричні параметри обраної підкріпленої вафельної конструкції:

$$\delta = 3,75 \text{ мм}; \quad h = 18,75 \text{ мм}; \quad a = 161,75 \text{ мм} \quad b = 162,15 \text{ мм}$$

$$s = c = 5,85 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{екв}} = 5,129 \text{ мм}$$

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

### ***Перевірка роботоспроможності***

Розрахуємо коефіцієнт запасу міцності за формулою ( $\delta = 5,129 \text{ мм}$ ):

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_p}$$

$$\text{Де } \sigma_p = \sigma_\alpha = \frac{T_{\text{екв}}^P(\text{max})}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta}$$

В результаті отримаємо:

$$\eta_m = \frac{\sigma_{0.2(t=150^\circ\text{C})} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta}{T_{\text{екв(max)}}^P} = \frac{200 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1,2 \cdot 5,129 \cdot 10^{-3}}{6,529 \cdot 10^6} = 1,19 \geq 1$$

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою ( $\delta = 5,129$  мм):

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{кр}}}{T_{\text{екв(max)}}^P}$$

$$T_{\text{кр}} = \left( \frac{2,5 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \right)^2 \cdot \frac{K_\sigma \cdot R \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot \delta_{\text{екв}}}{a^2}$$

$$T_{\text{кр}} = \left( \frac{2,5 \cdot 3,75 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \right)^2 \cdot \frac{6 \cdot 1,2 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 5,129 \cdot 10^{-3}}{(161,75 \cdot 10^{-3})^2} = 8,089 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{T_{\text{кр}}}{T_{\text{екв(max)}}^P} = \frac{8,089 \cdot 10^6}{6,529 \cdot 10^6} = 1,239 \geq 1$$

Отже, ми отримали працездатну оболонку, оскільки коефіцієнти запасу міцності та стійкості більші одиниці. Така оболонка через конструктивну ортотропність має більш близькі за значенням коефіцієнти міцності та стійкості. Ми отримали працездатну конструкцію, що має значно меншу масу, ніж гладка оболонка, оскільки еквівалентна товщина підкріпленої стінки (5,129 мм) значно менша, ніж гладкої (8,1 мм).

## 4.2 Проектувальний розрахунок днищ бака

### 4.2.1 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.

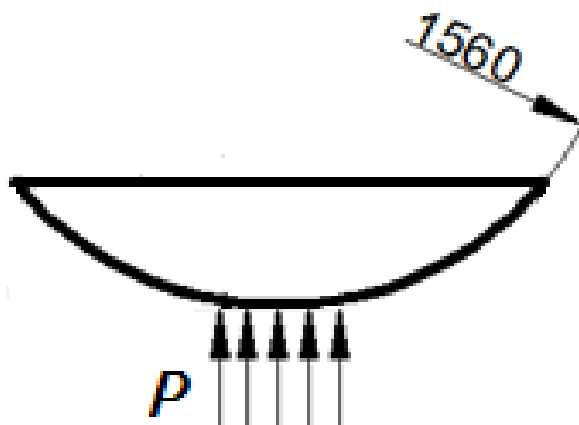


Рис.5

Розрахункова схема верхнього днища

### Проектувальний розрахунок гладкого сферичного днища

#### *Розрахунок на міцність*

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

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

де  $\Delta P$  - 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:

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

де  $\Delta P$  - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

$$P_{\max}^p \leq P_{\text{кр}}$$

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

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

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

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

## ***Висновки для верхнього днища з гладкою стінкою***

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

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

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

### Перевірка роботоспроможності

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

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_p}$$

$$\text{Де } \sigma_p = \sigma_\alpha = \sigma_\beta = \frac{P_{\text{max}}^p \cdot R_{\text{сф}}}{2 \cdot \delta}$$

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):

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

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.6, б).

Розрахунок проводитимемо по алгоритму, представленому в [1].

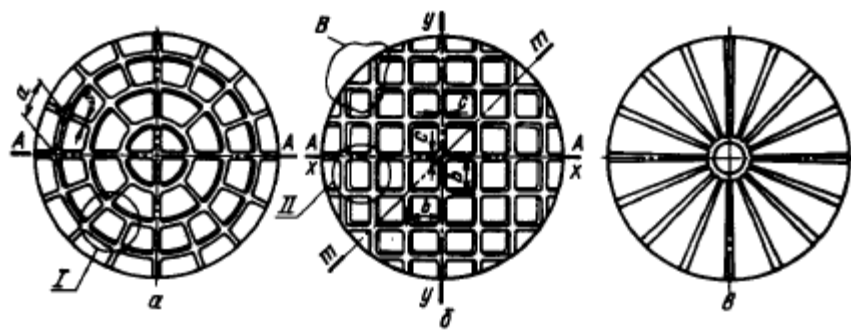


Рис.6

**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  $B$ , прийнявши коефіцієнт  $k = 0,3$ :

$$B = \frac{P_{кр} \cdot R^2}{k \cdot E_{(t=150^{\circ}\text{C})}} = \frac{0,63 \cdot 10^6 \cdot 1,562^3}{0,3 \cdot 5,8 \cdot 10^{10}} = 8,811 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

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:  $\delta = 4,4$  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:

$$b = \frac{1,415 \cdot \delta}{1 - \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{k_1 \cdot E_{(t=150^\circ\text{C})} \cdot \delta}{R \cdot P_{\text{мак}}^p}} =$$

$$= \frac{1,415 \cdot 4,35 \cdot 10^{-3}}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot 4,35 \cdot 10^{-3}}{1,56 \cdot 0,63 \cdot 10^6}} = 180,211 \text{ мм}$$

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 прийmemo:

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

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

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

### ***Висновки для конічної оболонки вафельної конструкції***

Отже, при використанні конструктивно-ортотропної оболонки днища бака ми отримали оболонку з еквівалентною товщиною значно меншою за

товщину з гладкою стінкою, що свідчить про раціональність використання такої конструкції та виконання умови мінімуму маси.

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

### ***Перевірка роботоспроможності***

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою:

$$\eta_{ст} = \frac{P_{кр}}{P_{max}};$$

Критичне значення тиску вирахуємо за формулою:

$$P_{кр} = \frac{K \cdot E_{(t=150^{\circ}C)} \cdot \delta^2}{R^2} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{\varphi^2} (\psi - 1)\right)$$

Звідси визначимо:

$$\eta_{ст} = \frac{\frac{0,3 \cdot 5,8 \cdot 10^{10} \cdot \delta^2}{1,56^2} \cdot \left(1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,225^2} (6 - 1)\right)}{0,635,8 \cdot 10^{10}} = 1,015 \geq 1$$

Отже, ми отримали працездатну оболонку, оскільки коефіцієнт запасу стійкості більший одиниці. Така конструкція забезпечує критерій мінімуму маси, так як товщина еквівалентної гладкої стінки менша ( $\delta_{екв} = 5,962$ ) ніж гладкої  $\delta = 7,4$  мм. З цього можна зробити висновок про раціональність проектування та використання підкріпленої оболонки.

## 4.2.2 Розрахунок нижнього днища бака

В даній конструкції використовується ввігнуте конічне 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.7.

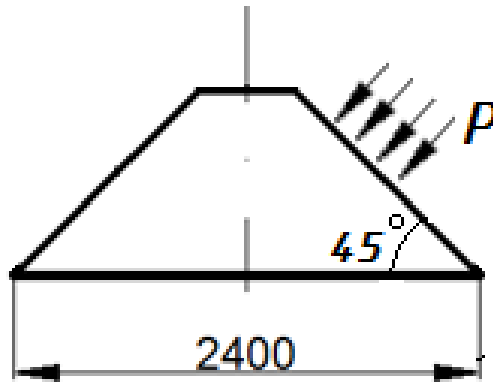


Рис.7

Розрахункова схема верхнього днища

## Проектувальний розрахунок гладкого конічного 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  $\Delta P$  - 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:

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

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:

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

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

### ***Розрахунок на стійкість***

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

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

де  $\Delta P$  - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

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

Визначимо критичну величину тиску:

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

Коефіцієнт  $\rho$  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 приймаємо:  $\delta = 13,45 \text{ мм}$

### ***Висновки для нижнього днища з гладкою стінкою***

Для забезпечення міцності та стійкості обираємо більше значення з двох отриманих товщин, тобто товщину в 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:

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

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.



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

$$= 1,785 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{2,5}$$

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:

$$b_1 = \frac{\delta}{1 - \frac{\varphi_1}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{k_1 \cdot E_{(t=50^{\circ}\text{C})} \cdot \delta \cdot \cos \varphi}{R \cdot P_{\text{max}}}} =$$

$$= \frac{5,05}{1 - \frac{0,225}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{4,5 \cdot 6,6 \cdot 10^{10} \cdot 5,05 \cdot \cos 45}{1,2 \cdot 0,705 \cdot 10^6}} = 185,45 \text{ мм}$$

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  $a_1 = b_1 = 185,45$  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:

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

- 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 роботоспроможності***

Розрахуємо коефіцієнт запасу стійкості за формулою:

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

Критичне значення тиску вираховуємо за формулою:

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

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

$$\eta_{\text{ст}} = 1,143 \geq 1$$

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.



### 4.2.3 Проектувальний розрахунок 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.

Приймаємо розрахункову схему, зображену на рис.6.

#### Розрахунок магістрального трубопроводу гладкої конструкції

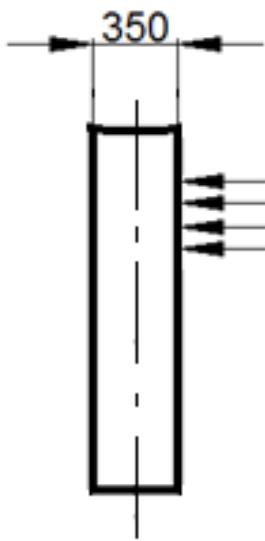


Рис.6

Розрахункова схема  
магістрального  
трубопроводу

Виходячи з геометрії баку визначимо висоту розрахункової циліндричної оболонки.

Висота циліндричної оболонки  $L = 6,815$  м.

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

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

Приймаємо розрахункове значення тиску:

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

$$= (0,32 + 0,004 + 0,1) * 1,5 = 0,63 \text{ МПа}$$

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:

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

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 прийmemo  $\delta = 1 \text{ мм}$ .

### ***Розрахунок на стійкість***

Визначимо величину розрахункового значення тиску:

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

де  $\Delta P$  - 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 прийmemo:  $\delta = 8,85 \text{ мм}$

### **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:

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

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:

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

де  $\Delta P$  - можливе відхилення значення тиску від номінального.

Товщину знайдемо виходячи з умови стійкості:

$$P_{max}^p \leq P_{кр}$$

Визначимо критичну величину тиску:

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

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

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

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 ( $\delta = 8,85 \text{ мм}$ ):

$$\eta_{\text{міц}} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_p}$$

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

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 ( $\delta = 8,85 \text{ мм}$ ):

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

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

4. Визначимо коефіцієнт  $\beta$ :

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

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

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

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

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

$$\delta_{\text{поч}} = \delta \cdot \psi = 3,15 \cdot 6 = 18,9 \text{ мм}$$

$$h = \delta_{\text{поч}} - \delta = 18,9 - 3,15 = 15,75 \text{ мм}$$

7. Розрахуємо геометричні параметри підкріплень:

Відстань між ребрами:

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

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

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:

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



## 4.3 Розрахунок шпангоутів

### 4.3.1 Розрахунок верхнього шпангоута

Розрахункова схема для розрахунку шпангоута зображена на рис.7:

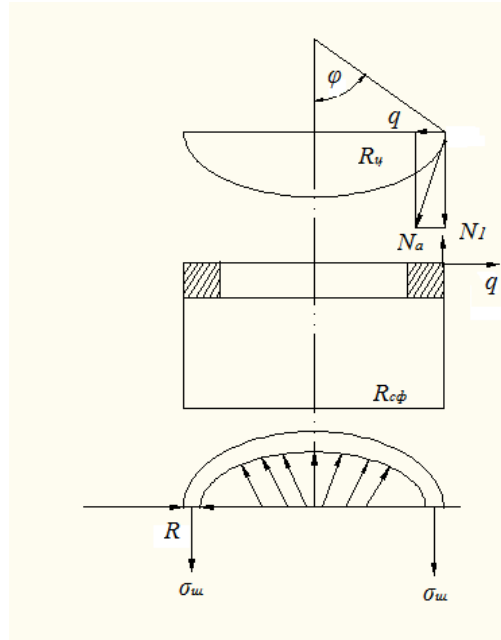


Рис.7

### Розрахункова схема шпангоута верхнього днища

В РВІ днище працює на стиск, тому шпангоут буде працювати на розтяг і умовою не руйнування є:

$$\sigma_{\text{ш}}^P \leq \sigma_{\text{в}}$$

Запишемо рівняння рівноваги в проекції на площину шпангоута:

$$2 * \sigma_{\text{ш}} * F_{\text{ш}} - q * 2 * R_{\text{сф}} = 0$$

звідси  $\sigma_{\text{ш}}$  виразимо таким чином:

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{q * R_{\text{сф}}}{F_{\text{ш}}} = \frac{P^p_{\text{max}} * R_{\text{ц}}^2}{2 * \text{tg } \varphi * F_{\text{ш}}}$$

Площу шпангоуту будемо розраховувати з попереднього виразу:

$$A_{\text{ш}} = \frac{P^p_{\text{max}} * R_{\text{ц}}^2}{2 * \text{tg } \varphi * \sigma_{\text{в}}}$$

$$\sin \varphi = \frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{сф}}} = \frac{1,5}{1,95} = 0,7692$$

$$\varphi = 50,3^{\circ}$$

$$\text{tg } \varphi = 1,2$$

$$P_{\text{max}}^{\text{p}} = 0,63 \text{ МПа}$$

Підставивши данні отримаємо необхідну площу поперечного розрізу:

$$A_{\text{ш}} = \frac{0,63 * 1,2^2}{2 * 1,2 * 250} = 0,001512 \text{ м}^2 = 15,12 \text{ см}^2$$

Міцність шпангоута буде забезпечено при площі поперечного перетину:

$$A_{\text{ш}} = 15,12 \text{ см}^2$$

Момент інерції:

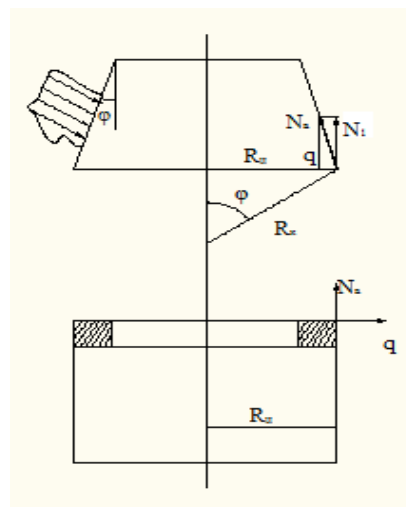
$$J = 1,5 * A_{\text{ш}}^2 = 1,5 * 15,12^2 = 342,92 \text{ см}^4$$

Маса шпангоута:

$$M = 2 * \pi * R * A_{\text{ш}} * \rho = 2 * \pi * 1,2 * 0,001512 * 2640 = 30,1 \text{ кг}$$

#### 4.3.2 Розрахунок нижнього шпангоута

Розрахункова схема для розрахунку шпангоута зображена на рисунку 10:



**Рис.8 Розрахункова схема шпангоута верхнього днища.**

В РВІ днище працює на стиск, тому шпангоут буде працювати на розтяг і умовою не руйнування є:

$$\sigma_{ш}^P \leq \sigma_B$$

Визначимо площу шпангоутів в місцях конічного днища з циліндричною стінкою бака:

$$A_{ш} = \frac{P_{max}^p * R_{ц}^2}{2 * tg \varphi * \sigma_B}$$

$$\varphi = 45^\circ$$

$$tg \varphi = 1$$

$$P_{н\ max}^p = P_{н\ max}^p + P_{г\ max}^p = 0,7535 \text{ МПа}$$

Підставивши данні отримаємо необхідну площу поперечного розрізу:

$$A_{ш} = \frac{0,63 * 1,2^2}{2 * 1,2 * 250} = 0,001637 \text{ м}^2 = 16,37 \text{ см}^2$$

Міцність шпангоута буде забезпечено при площі поперечного перетину:

$$A_{ш} = 16,37 \text{ см}^2$$

Міцність шпангоута буде забезпечено при площі поперечного перетину:

$$A_{ш} = 16,37 \text{ см}^2$$

Момент інерції:

$$J = 1.5 * A_{ш}^2 = 1.5 * 16,37^2 = 401,97 \text{ см}^4$$

Маса шпангоута:

$$M = 2 * \pi * R * A_{ш} * \rho = 2 * \pi * 1.2 * 0,001637 * 2640 = 32.58 \text{ кг}$$

### 4.3.3 Розрахунок закінцівок

Так як під час виготовлення бака його складові частини зварюються, то в зоні зварювання виникає необхідність збільшення товщини металу. Бо відомо що при нагріванні нагартований матеріал АмГбН перетворюється в м'який АмГбМ, і необхідно забезпечити міцність зварного шва. Зниження

характеристик м'якого матеріалу буде на 10% для швів першої категорії, і на 20% для швів другої категорії.

Товщина і довжина закінцівки для стінки бака:

$$h_{\text{зак}} = 1,4 * h_{\text{гл}} = 1,4 * 8,1 = 11,34 \text{ мм}$$

$$l_{\text{зак}} = (3 \div 7) * h_{\text{зак}} = 7 * 11,34 = 79,38 \text{ мм}$$

Товщина і довжина закінцівки для верхнього днища:

$$h_{\text{зак}} = 1,2 * h_{\text{гл}} = 1,2 * 7,4 = 8,88 \text{ мм}$$

$$l_{\text{зак}} = (3 \div 7) * h_{\text{зак}} = 7 * 8,88 = 62,16 \text{ мм}$$

Товщина і довжина закінцівки для нижнього днища:

$$h_{\text{зак}} = 1,2 * h_{\text{гл}} = 1,2 * 13,45 = 16,14 \text{ мм}$$

$$l_{\text{зак}} = (3 \div 7) * h_{\text{зак}} = 7 * 14,4 = 112,98 \text{ мм}$$

Товщина і довжина закінцівки для магістрального трубопроводу:

$$h_{\text{зак}} = 1,2 * h_{\text{гл}} = 1,2 * 13,45 = 10,62 \text{ мм}$$

$$l_{\text{зак}} = (3 \div 7) * h_{\text{зак}} = 7 * 14,4 = 74,34 \text{ мм}$$

## 5. Розрахунок маси конструкції та елементів

Для кожного елемента конструкції розрахунок маси будемо проводити таким чином:

$$M = S_{\phi} * \delta * \rho;$$

Розрахуємо масу для кожного елемента вафельної та гладкої оболонки та зробимо порівняльну таблицю:

1) Несуща оболонка:

$$M_{\text{гл}} = 2 * \pi * R * H * \delta * \rho = 2 * \pi * 1,2 * 8,4 * 0,0081 * 2640 = 1354,35 \text{ кг}$$

$$M_{\text{вф}} = 2 * \pi * R * H * \delta_{\text{екв}} * \rho = 2 * \pi * 1,2 * 0,005129 * 2640 = 857 \text{ кг}$$

2) Верхнє днище:

$$M_{\text{гл}} = 2 * \pi * R * h * \delta * \rho = 2 * \pi * 1,56 * 0,563 * 0,0074 * 2640 = 107,81 \text{ кг}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{вф}} &= 2 * \pi * R * H * \delta_{\text{екв}} * \rho = \\ &= 2 * \pi * 1,56 * 0,563 * 0,005962 * 2640 = 86,86 \text{ кг} \end{aligned}$$

3) Нижнє днище:

$$\begin{aligned} M_{\text{гл}} &= \pi * (R + r) * L * \delta * \rho = \\ &= \pi * (1,2 + 0,175) * 1,45 * 0,01345 * 2640 = 222,41 \text{ кг} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{вф}} &= \pi * (R + r) * L * \delta_{\text{екв}} * \rho = \\ &= \pi * (1,2 + 0,175) * 1,45 * 0,007712 * 2640 = 127,52 \text{ кг} \end{aligned}$$

4) Трубопровід:

$$\begin{aligned} M_{\text{гл}} &= 2 * \pi * r * l * \delta * \rho = \\ &= 2 * \pi * 0,175 * 6,815 * 0,00885 * 2640 = 175,08 \text{ кг} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{вф}} &= 2 * \pi * r * l * \delta_{\text{екв}} * \rho = \\ &= 2 * \pi * 0,175 * 6,815 * 0,003696 * 2640 = 73,12 \text{ кг} \end{aligned}$$

Узагальнююча таблиця масових характеристик

Елемент	Гладка оболонка		Вафельна оболонка	
	Товщ. стілки, мм	Маса, кг	Товщ. стілки, мм	Маса, кг
Нес. оболонка	8,1	1354,35	5,129	857
Верхнє днище	7,4	107,81	5,962	86,86
Нижнє днище	13,45	222,41	7,712	127,52
Трубопровід	8,85	175,08	3,696	73,12
Шпангоути	—	30,1	—	32,58
Усього	—	1889,75	—	1177,08

## 6. Перевірочний розрахунок сухого відсіку

Сухі перехідні відсіки представляють собою тонкостінні конструкції, в яких осьові, стискаючі чи розтягуючі зусилля, сприймаються силовими елементами – стрингерами.

Як показує практика для цих конструкцій модель конструктивно-ортотропної оболонки не має експериментального підтвердження.

Розрахунок сухих клепаных конструкцій стрингерних підсилень виконують по приблизній методиці з використанням експериментальних закономірностей.

Конструкції вважаються навантаженими рівномірно по всій площі поперечного перерізу.

Для сухого відсіку допускається втрата стійкості обшивки між стрингерами.

Особливості відсіку, які необхідно врахувати при розрахунку:

1. Для великих частин відсіку допускається втрата стійкості обшивки між шпангоутами.
2. Відсік піддається інтенсивному нерівномірному підігріву. В першому наближенні цю нерівномірність не враховують.
3. Дія осьової сили і моменту зводиться до еквівалентного.

$$T_{\text{екв}} = T + \frac{2 * M}{R}$$

Розрахунок сухого відсіку проводимо використовуючи програму “Drybay”. Вводимо вихідні дані (геометричні розміри відсіку, навантаження). Після цього програма підбирає кількість, крок розташування та профіль спочатку для стрингерів, а потім для шпангоутів. При цьому програма власноруч обирає товщину обшивки зі стандартних листів так, щоб виконувалися необхідні умови і маса була мінімальною. Маса розраховується як густина кожної деталі, помножена на її об’єм. Підраховується маса всього відсіку і користувачеві повідомляються найкращі характеристики (перелічені вище).

Далі, після проведення розрахунку для двох розрахункових випадків та трьох товщин оболонок: 1мм; 1,5 мм; 2 мм, обираємо ту з конструкцій, яка має мінімум маси та робимо перевіряючий розрахунок для такої конструкції.

## Вихідні дані для розрахунку

Форма сухого відсіку – циліндр,  $D=1,9$  м;  $H=2,4$  м.

Таблиця навантажень конструкції

РВ	$T^e, Н \cdot 10^5$	$M^e, Нм \cdot 10^5$
РВІІ	3,5	2,2
РВІІІ	6	-

Проведемо розрахунок в програмі "Drybay":

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ГЕОМЕТРИЯ ОБОЛОЧКИ :

радиус оболочки = 95.0 [см]  
длина оболочки = 240.0 [см]

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ :

осевое сжимающее усилие = 35000. [кгс]  
изгибающий момент = 220000. [кгс\*см]

Коэффициент безопасности = 1.30

Максимально допустимое значение критерия " Г " = 60.

	стрингер	шпангоут	обшивка
модуль упругости 1-го рода [кгс/ (см*см) ]	.720E+06	.720E+06	.700E+06
предел пропорц.-ти [кгс/ (см*см) ]	1450.	=====	1450.
предел текучести [кгс/ (см*см) ]	3000.	=====	2800.
удельный вес [Г/ (см*см*см) ]	2.640	2.640	2.640

Вид расчета: ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ

ПРОСТРАНСТВО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ :

1. N-стрингеров - [ 30 ..... 60] или [ 9.9 см ..... 19.9 см]
2. N-шпангоутов - [ 4 ..... 7] или [ 30.0 см ..... 48.0 см]



3. Обшивка - [ .10 .... .10] [см]  
4. Характеристики профилей:  
стрингер - набор из 39 стандартизованных профилей  
типов ПР101, ПР109, ПР307  
шпангоут - набор из 15 стандартизованных профилей  
типа ПР105  
(смотри файл " profill.dat ")
- 

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

##### ОПТИМАЛЬНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ :

Количество стрингеров = 30 или 19.9 см  
Тип профиля стрингеров - ПР101  
Номер профиля стрингеров - 11

Количество шпангоутов = 5 или 40. см  
Тип профиля шпангоутов - ПР105  
Номер профиля шпангоутов - 15

Толщина обшивки = .100 [см]

##### ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБОЛОЧКИ :1

Параметры промежуточного  
шпангоута соответствуют критерию " Г " = 41.

Вес оболочки = 54. [кгс]  
( без учета торц. шп.-тов, фитингов,  
деталей общей сборки, конструктивных особенностей )

Эквивалентное расчетное осевое усилие = 51521. [кг]

Коэфф.запаса прочности по общей устойчивости = 1.0340  
Коэфф.запаса прочности по местной устойчивости = 1.4746

---

---

## Проведемо перевірку оболонки з отриманими параметрами

Величина критичної сили визначається з суперпозиції:

$$T = \sum_{i=1}^n (\sigma_{\max}^c * A_{ci}) + \sum_{i=1}^n b \delta \sigma_{\text{cp}}^o ;$$

Критичні напруження втрати стійкості оболонки:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{кр}}^o &= k E_o \left( \frac{\delta_o}{R} \right)^2 + 0.1 E_o \frac{\delta}{R} = \\ &= 3.6 * 7 * 10^{10} \left( \frac{0.001}{0.95} \right)^2 + 0.1 * 7 * 10^{10} \frac{0.001}{0.95} = 13,732 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Критичні напруження загальної втрати стійкості:

$$\sigma_{\text{кр}}^o = \frac{c \pi^2 E I_{\min}}{A_c (l_c^2)} = \frac{1.5 * 3.14^2 * 7 * 10^{10} * 0.587 * 10^{-8}}{0.6 * 10^{-6} * 0.4^2} = 270 \text{ МПа}$$

Критичні напруження місцевої втрати стійкості:

$$\sigma_{\text{кр}}^c = k_{\sigma} E \left( \frac{\delta_c}{h_c} \right)^2 = 0.327 * 7.2 * 10^{10} \left( \frac{0.0015}{0.02} \right)^2 = 132,435 \text{ МПа}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}^c &= \sigma_{02} \left( 1 - \left( 1 - \frac{\sigma_{\text{п}}}{\sigma_{\text{т}}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{\text{п}}}{\sigma_{\text{кр}}^o}} \right) = \\ &= 300 \left( 1 - \left( 1 - \frac{195}{300} \right) \sqrt{\frac{300}{23}} \right) = 186,605 \text{ МПа} \end{aligned}$$

З умови сумісності деформацій

$$\sigma_{\max}^o = \frac{E_o}{E_c} \sigma_{\max}^c = \frac{7 * 10^{10}}{7.2 * 10^{10}} 186,605 * 10^6 = 181,421 \text{ МПа}$$

З врахуванням величини механічних характеристик матеріалу:

$$A = 1 + \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\text{п}} \sigma_{\text{т}}}{\sigma_{\text{п}}^2} \left( 1 - \frac{\sigma_{\text{п}}}{\sigma_{\text{т}}} \right)^2 = 1 + \frac{1}{2} \frac{1145 * 230}{145^2} \left( 1 - \frac{145}{300} \right)^2 = 1.1$$

$$\sigma_{max}^o = \frac{\sigma_{02}^o}{A + \sqrt{A^2 - 1}} = \frac{230}{1.1 + \sqrt{1.1^2 - 1}} = 148 \text{ МПа}$$

Знайдемо середнє значення напруження:

$$\sigma_{cp}^o = \sqrt{\sigma_{max}^o \sigma_{кр}^o} = \sqrt{181,421 * 13,732} = 49,9 \text{ МПа}$$

Звідси критичне значення сили:

$$\begin{aligned} T_{кр} &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{max}^c * A_{ci}) + \sum_{i=1}^n b \delta \sigma_{cp}^o = \\ &= 30 * (186,605 * 10^6 * 0.6) + 30 * 0.15 * 0.001 * 49,9 * 10^6 = 6,339 * 10^5 \text{ Н} \end{aligned}$$

Запас стійкості становить:

$$\eta = \frac{T}{T_p} = \frac{6,339 * 10^5}{5,052 * 10^5 * 1.3} = 1.255 \geq 1$$

## 7.Висновки

Отже, після проведення проектувальних розрахунків для баку окисника першої ступені ракети можна зробити висновки про те, що конструктивно-ортотропні конструкції доцільно використовувати в ракетній техніці, оскільки це забезпечує значний вииграш по масі, що серйозно підвищує ефективність ракети та її масову досконалість.

При проектуванні даного баку, використовуючи конструктивно-ортотропні оболонки вдалося добитися вииграшу по масі майже на 38 %.

## 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., Алфутов 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.