

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра технічної теплофізики

«До захисту  
допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
Сергій ВАНЄЄВ  
(підпис)

«16» 06.2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня бакалавр**  
зі спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»,  
освітньо-професійної програми «Компресори, пневмоагрегати та вакуумна  
техніка»

на тему: Міжступеневий холодильний з водяним охолодженням для  
двоступеневого повітряного поршневого компресора

Здобувача групи: ХК-91/3к-1  
(шифр групи)

Кожушко Максим Вячеславович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело.

\_\_\_\_\_  
(підпис) Кожушко Максим Вячеславович  
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник ст. викл. каф. ТТФ, к.т.н. Максим Прокопов  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

## Зміст

1 Вихідні данні .....	2
2 Математична модель.....	5
3 Розрахунок параметрів	
3.1 Розрахунок параметрів теплоносіїв.....	6
3.2 Результати.....	9
4 Теплофізичні властивості теплоносіїв.....	9
4.1 Гаряча охолоджуюча рідина .....	10
4.2 Холодна охолоджуюча рідина .....	11
4.3 Ескізна схема розташування теплообмінника .....	14
5 Гідравлічні та аеродинамічні, теплові розрахунки .....	15
5.1 Холодна охолоджуюча рідина .....	16
5.1.1 Гідравлічний розрахунок.....	16
5.1.2 Тепловий розрахунок .....	16
5.2 Гаряча охолоджуюча рідина .....	16
5.2.1 Аеродинамічний розрахунок.....	16
5.2.2 Тепловий розрахунок .....	17
6 Розрахунок міцності.....	18
6.1 Вибір проектних тисків.....	18
6.2 Розрахунок оболонки теплообмінника.....	19
6.3 Розрахунок еліптичного днища теплообмінника.....	
7 Охорона праці та безпека.....	
7.1 Техніка безпеки при експлуатації трубопроводів.....	26
7.2 Техніка безпеки при експлуатації балонів.....	28
Література.....	31

					К 04Б.00.00.00 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка рекуперативного теплообмінника	Лист	Лист	Аркушів
Разраб.		Кожушко						
Провер.		Прокопов					2	31
Реценз.						Група Хк91-КЗ		
Н. Контр.								
Утверд.		Ванеев						

## 1 Вихідні дані

Мета: розробка рекуперативного теплообмінника для проміжного охолодження повітряно-компресорної установки.

Вихідні дані наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані відповідно до варіанту

Об'ємний потік повітря, $\frac{м^3}{мин}$	$\dot{V} = 110$
Тиск всмоктування, МПа	$p_{вс} = 0.22$
Температура всмоктування, °С	$t_{вс} = 36$
Степень повышения давления	$\beta = 1.4$
Політропна ефективність, %	$\eta_n = 85$
Умовний політропний показник	$\bar{n} = 1.35$
Горячий теплоноситель	Повітря
Холодна охолоджуюча рідина	Вода
Тип теплообмінника	Регенеративний
Температура холодносія, що надходить, °С	$t'_w = 20$

					<i>К 04Б.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		4

## 2 Математична модель

Газове рівняння стану:

$$p = \rho \cdot R \cdot T . \quad (2.1)$$

Перший закон термодинаміки:

$$dh = \delta \pm \delta q . \quad (2.2)$$

Робота компресора в політропному наближенні:

$$l_{\kappa} = \eta_n^{-1} \cdot \left( \frac{\bar{n}}{\bar{n} - 1} \right) \cdot R \cdot T_{\text{вс}} \cdot \left( \beta^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}} - 1 \right) . \quad (2.3)$$

Рівняння адитивності:

$$C_{pm} = \frac{c_{pm1} \cdot t_1 - c_{pm2} \cdot t_2}{t_1 - t_2} . \quad (2.4)$$

Тепловий потік, взятий з гарячого теплоносія:

$$\dot{Q}_1 = \dot{G}_1 \cdot C_{pm}^{\text{гар}} \cdot (t_1' - t_1'') . \quad (2.4)$$

Тепловий потік передається холодному теплоносію:

$$\dot{Q}_2 = \dot{G}_2 \cdot C_{pm}^{\text{хол}} \cdot (t_2'' - t_2') . \quad (2.5)$$

Логарифмічна середня температура напору:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \left( \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} \right)} . \quad (2.6)$$

Рівняння Ньютона-Ріхмана:

$$\dot{Q} = k \cdot F \cdot \Delta \bar{t} . \quad (2.7)$$

Коефіцієнт теплопередачі в I-му наближенні:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} . \quad (2.8)$$

Рівняння неперервності має вигляд:

$$\dot{G} = \rho \cdot w \cdot f . \quad (2.9)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт теплопередачі для гладких труб:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт теплопередачі в II наближенні:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d}{d_{BH}} + \frac{\delta}{\lambda_{CT}}} \quad (2.12)$$

Ступінь ефективності ребра:

$$E = \frac{th(m \cdot h')}{m \cdot h'} \quad (2.13)$$

Коефіцієнт кільцевого простору:

$$\chi = \left(1 - \frac{\delta_p}{s_p}\right) \cdot \frac{d}{d_{BH}} \quad (2.14)$$

Коефіцієнт теплопередачі від ребристих трубок:

$$\alpha_{op} = \alpha \cdot [\chi + E \cdot (\varepsilon - \chi)] \quad (2.15)$$

Коефіцієнт теплопередачі від ребристих трубок:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{op}} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{d_H}{d_{BH}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{h_p}{\lambda}} \quad (2.16)$$

Втрати тиску через ребрення труб:

$$\Delta p' = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot Z \cdot C'_Z \quad (2.17)$$

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

### 3. Розрахунок параметрів

#### 3.1 Розрахунок параметрів теплоносія

З (2.1) щільність гарячого теплоносія на вході компресора:

$$\rho_{вс} = \frac{P_{вс}}{R \cdot T_{вс}} = \frac{0.22 \cdot 10^6}{287 \cdot (273 + 46)} = 2.4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

де  $R$  – газова постійна для повітря.

Масова витрата гарячого теплоносія:

$$\dot{G}_1 = \rho_{вс} \cdot \dot{V} = 2.4 \cdot 110 = 6.81 \frac{\text{кг}}{\text{сек}}.$$

З рівняння політропного стиснення визначимо температуру гарячого теплоносія після процесу стиснення в компресорі:

$$t_{1\text{дв}} = t_1' = T_{\text{дв}} \cdot \beta^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}} - 273 = (273 + 46) \cdot 1.4^{\frac{1.35-1}{1.35}} - 273 = 75^\circ \text{C}.$$

Заздалегідь вимірюємо температуру гарячого теплоносія при виході із Теплообмінник дорівнює  $t_1'' = (t_2' + 5 \dots 15) = 20 + 5 = 25^\circ \text{C}$ .

Ми вважаємо, що теплоємність не сильно залежить від тиску:

$$c_{pm}(t_1') = 1.008 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$c_{pm}(t_1'') = 1.005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Згідно з (2.4):

$$C_{pm}^{гар} = \frac{c_{pm}(t_1') \cdot t_1' - c_{pm}(t_1'') \cdot t_1''}{t_1' - t_1''} = \frac{1.008 \cdot 75 - 1.005 \cdot 25}{75 - 25} = 1.0095 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тепловий потік, взятий з гарячого теплоносія, (2.5)

$$\dot{Q}_1 = 6.81 \cdot 1.0095 \cdot (75 - 25) = 344 \frac{\text{кДж}}{\text{сек}}.$$

Заздалегідь вимірюємо температуру холодного теплоносія на виході з теплообмінника Рівний  $t_2'' = (t_2' + 2 \dots 4) = 20 + 4 = 24^\circ \text{C}$ .

Теплоємність холодного теплоносія:

$$c_{pm}(t_2'') = 4.183 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

$$c_{pm}(t_2'') = 4.181 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Згідно з (2.4):

$$C_{pm}^{хол} = \frac{c_{pm}(t_2') \cdot t_2' - c_{pm}(t_2'') \cdot t_2''}{t_2' - t_2''} = \frac{4.183 \cdot 20 - 4.181 \cdot 24}{20 - 24} = 4.171 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Будемо вважати, що немає втрат в теплопередачі між холодними і гарячими теплоносіями:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$$

Из (2.5) знайти масову витрату холодної теплорідини:

$$\dot{G}_2 = \frac{\dot{Q}_1}{C_{pm}^{хол} \cdot (t_2'' - t_2')} = \frac{344}{4.171 \cdot 4} \cong 20.6 \frac{\text{кг}}{\text{сек}}$$

Специфіка компресорного стиснення, (2.3):

$$l_k = 0.85^{-1} \cdot \left( \frac{1.35}{1.35 - 1} \right) \cdot 287 \cdot (273 + 46) \cdot \left( 1.35^{\frac{1.35-1}{1.35}} - 1 \right) = 37.87 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Тиск гарячого теплоносія на вході теплообмінника:

$$p_{ex} = p_{вс} \cdot \beta = 0.22 \cdot 1.4 = 0.308 \text{ МПа}$$

Тиск гарячого теплоносія на виході з теплообмінника:

$$p_{вых} = p_{ex} \cdot 0.98 = 0.301 \text{ МПа}$$

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8





## 4 Теплофізичні властивості теплоносіїв

### 4.1 Гаряча охолоджуюча рідина

Параметри на вході в теплообмінник.

З рівняння (2.1) визначається щільність теплоносія:

$$\rho_1' = \frac{p_1'}{R \cdot T_1'} = \frac{0.308 \cdot 10^6}{287 \cdot (273 + 75)} = 3.1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\rho_1'' = \frac{p_1''}{R \cdot T_1''} = \frac{0.3 \cdot 10^6}{287 \cdot (273 + 25)} = 5.53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

де тиск і температура беруться зі столу. 3.2.

Середнє значення щільності гарячого теплоносія:

$$\bar{\rho}_1 = 0.5 \cdot (\rho_1' + \rho_1'') = 0.5 \cdot (3.1 + 5.53) \cong 3.3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Середня температура теплоносія:

$$\bar{t}_1 = 0.5 \cdot (t_1' + t_1'') = 0.5 \cdot (75 + 25) \cong 50^\circ \text{C}.$$

Будемо вважати, що теплофізичні властивості речовини не залежать від тиску в даному випадку.

Для заданої температури  $\bar{t}_1 = 50^\circ \text{C}$ , из [1] ст. 27 Значення наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 4.1 – Теплофізичні властивості гарячого теплоносія

$\lambda_1 \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a_1 \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu_1 \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu_1 \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\text{Pr}_1$
2.82	25.6	1.94	17,8	0.698



Від (2.7), Площа теплообміну:

$$F = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t} = \frac{344.2 \cdot 10^3}{42.9 \cdot 19.8} = 405 \text{ м}^2,$$

Де  $k$  – Коефіцієнт теплопередачі (2.8):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{1}{300}} \approx 43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

где  $\alpha_1 = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  – коефіцієнти, взятые из [1] с.9.  
 $\alpha_2 = 300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

Результати розрахунків і теплофізичні властивості теплоносіїв наведені в таблиці 3.3.

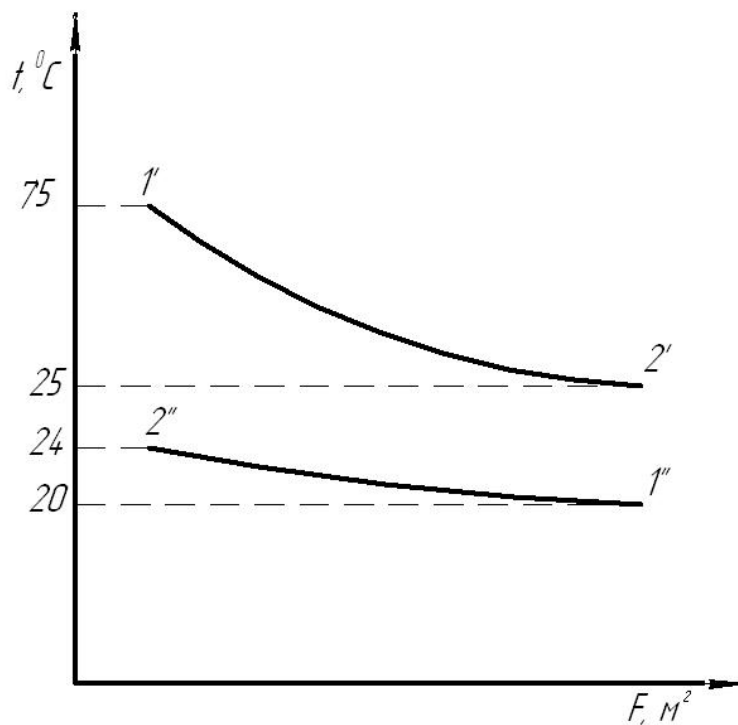


Рисунок 4.1 – Протиточна схема руху теплоносіїв

					<i>К 04Б.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

**Таблица 4.3 – результати розрахунку**

	Гарячий теплоносій		холодний теплоносій	
	1'	1"	2'	2"
Температура, °C	75	25.00	20.00	24.00
Тиск, МПа	0.308	0.30	0.1013	0.1013
Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	3,8	3,53	998.20	997.20
Теплопровідність, $10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	2.82		60.70	
кінематична в'язкість, $10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	17.80		92.60	
Число Прандтля	0.70		638.00	
Середня логарифмічна різниця температур, $\Delta \bar{t}, ^\circ \text{C}$	19.83			
Площа поверхні теплообміну, $\text{м}^2$	405,04			



## 5.1 Холодна охолоджуюча рідина

### 5.1.1 гідравлічний розрахунок

Число Рейнольдса (2.10):

$$PRe_2 = \frac{0.6 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{0.926 \cdot 10^{-6}} \cong 1,17 \cdot 10^4.$$

Режим протікання турбулентний.

Місцевий опір береться від [1], с. 22:

$$\zeta = 2.5.$$

Коефіцієнт гідравлічного опору при сталому потоці:

$$\xi_{\infty} = 0.11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_{BH}} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{Pr_2}{Pr_C} \right)^{-0.33} = 0.11 \cdot \left( \frac{0.002}{18} + \frac{68}{1.17 \cdot 10^4} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{6.38}{4.31} \right)^{-0.33} = 0.0268$$

Повна втрата тиску:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left( \xi_{\infty} \cdot \frac{L \cdot z}{d_B} + \zeta \cdot (z-1) \right) \cdot \frac{\rho'_2 \cdot (w'_2)^2}{2} = \\ &= \left( 0.026 \cdot \frac{7.22 \cdot 6}{18 \cdot 10^{-3}} + 2.5 \cdot (6-1) \right) \cdot \frac{998.2 \cdot 0.6^2}{2} \cong 13.8 \text{ кПа} \end{aligned}$$

### 5.1.2 Тепловий розрахунок

Середня тепловіддача:

$$\begin{aligned} Nu_{\infty} &= 0.0235 \cdot (Re^{0.8} - 230) \cdot (1.8 \cdot Pr^{0.3} - 0.8) \cdot \left( 1 + \left( \frac{d}{L \cdot z} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_C} \right)^{0.25}, \\ Nu_{\infty} &= 0.0235 \cdot ((1.17 \cdot 10^4)^{0.8} - 230) \cdot (1.8 \cdot 6.38^{0.3} - 0.8) \cdot \left( 1 + \left( \frac{18 \cdot 10^{-3}}{7.22 \cdot 6} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot \left( \frac{6.38}{4.31} \right)^{0.25} = 95.2 \end{aligned}$$

Коефіцієнт теплопередачі (2.11):

$$\alpha_2 = \frac{95.2 \cdot 60.7 \cdot 10^{-2}}{23.3 \cdot 10^{-3}} = 3248 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

## 5.2 Гаряча охолоджуюча рідина

### 5.2.1 Аеродинамічний розрахунок

										Лист
										16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						



Кількість труб по великій діагоналі:

$$m = \sqrt{\frac{n \cdot z - 0.25}{0.75}} = \sqrt{\frac{135 \cdot 6 - 0.25}{0.75}} \cong 33.$$

Область потоку:

$$f_{\text{non}} = L \cdot (D - m \cdot d) \cdot \frac{1}{x+1} = 7,22 \cdot (1,92 - 33 \cdot 22 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{1}{3+1} = 2,45 \text{ м}^2,$$

$x=3$  - кількість перегородок в кожусі (в радіальному напрямку).

Середня витрата теплоносія:

$$\bar{w}_1 = \frac{\dot{G}_1}{\bar{\rho}_1 \cdot f_{\text{non}}} = \frac{6,8}{2,4 \cdot 2,45} = 1,15 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Місцевий опір вжито из [1], с. 22:

$\zeta_1 = 1,5$  - вхід в кільцевий простір під кутом 90 до холодного теплоносія;

$\zeta_2 = 0,5$  - Обгортання навколо радіальних перегородок;

$\zeta_3 = 1,0$  - вихід з кільцевого простору під кутом 90 до холодного

теплоносія.

Коефіцієнт радіальних втрат витрати пучка труб:  $\zeta = 1,0$ .

Загальний аеродинамічний опір:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{поп}} + \Delta p_{\text{пр}} + \Delta p_M = 0,5 \cdot \bar{\rho}_1 \cdot \bar{w}_1^2 \cdot (\zeta \cdot (x+1) \cdot m + \zeta_1 + x \cdot \zeta_2 + \zeta_3 + 0,2 \cdot m),$$
$$\Delta p = 0,5 \cdot 2,4 \cdot 1,15^2 \cdot (1 \cdot (3+1) \cdot 33 + 1,5 + 0,5 \cdot 3 + 1,0 + 0,2 \cdot 33) \approx 201,05 \text{ Па}$$

Прийнята втрата тиску:  $[\Delta p] = 0,02 \cdot p'_1 = 0,02 \cdot 0,638 \cdot 10^6 = 12760 \text{ Па}$ .

$\Delta p < [\Delta p]$ , Умова виконана.

Число Рейнольдса (2.10):

$$\text{Re}_1 = \frac{1,15 \cdot 22 \cdot 10^{-3}}{18,1 \cdot 10^{-6}} \cong 1401,$$

$$40 < \text{Re}_1 < 10^4.$$

### 5.2.2 Тепловий розрахунок

Середня тепловіддача для однієї трубки в середині балки:

$$\text{Nu}_1^{11} = A \cdot \text{Re}_1^m \cdot \text{Pr}_1^n \cdot \left( \frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} = 0,71 \cdot (1401)^{0,5} \cdot 0,698^{0,36} \cdot \left( \frac{0,698}{0,699} \right)^{0,25} \cong 23,34,$$

										Лист
										17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

К 04Б.00.00.00 ПЗ

де знаходяться параметри  $A$ ,  $m$ ,  $n$  – взяті із [1], с.21.

Передача тепла від усього пучка труб:

$$Nu_1 = Nu_1^{11} \cdot C_\beta \cdot C_z \cdot C_\Delta = 23.34 \cdot 1 \cdot 1.0 \cdot 1 = 23.34,$$

де  $C_\beta = 1$  – Коефіцієнт кута атаки;

$C_z = 1.0$  – враховує вплив кількості серій; Визначається рис. В1 [1], с.20.

Коефіцієнт теплопередачі (2.11):

$$\alpha_1 = \frac{23.35 \cdot 2.82 \cdot 10^{-2}}{22 \cdot 10^{-3}} \cong 29.93 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Коефіцієнт теплопередачі (2.12):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{29.93} + \frac{1}{3248} \cdot \frac{22}{18} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{58.1}} = 29.56 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Площа теплообмінника (2.7):

$$F = \frac{344 \cdot 10^3}{29.56 \cdot 19.82} = 587 \text{ м}^2.$$

Довжина трубки:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot n \cdot z} = \frac{587}{3.14 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 135 \cdot 6} = 10.46 \text{ м}.$$

Довжина труби велика, щоб її зменшити, необхідно інтенсифікувати теплообмінник.

## Розділ 6 Розрахунки міцності

### 6.1. Вибір розрахункових тисків

Абсолютний тиск в теплообміннику  $P^{abc} = 0,22 \text{ МПа}$ .

Потім виникає надлишковий внутрішній тиск:

$$P = P^{abc} - 0,1 = 0,22 - 0,1 = 0,12 \text{ МПа};$$

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Розрахункові тиски в апараті з робочим надлишковим тиском  $p > 0,07$  МПа  
Визначаємо за формулою:

$$P_R = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \cdot p \\ p + 0,1 \end{array} \right\} ,$$

где  $p$ —Надмірний внутрішній тиск для елемента апарату, МПа.

Тоді розрахунковий тиск в апараті:

$$P_R = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \cdot 0,12 \\ 0,12 + 0,1 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,132 \\ 0,220 \end{array} \right\} = 0,22 \text{ МПа}$$

Тиск гідравлічного випробування визначається за формулою:

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \\ P + 0,3 \end{array} \right\}$$

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot 0,22 \cdot \frac{184}{180} \\ 0,22 + 0,3 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,28 \\ 0,52 \end{array} \right\} = 0,52 \text{ МПа}$$

## 6.2 Розрахунок оболонки теплообмінника

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19



где  $\sigma_m = 276$  МПа – предел текучести при температуре гидротестирования;  
 $n = 1,1$  – коэффициент запаса при гидротестировании.

$$[\sigma_r] = \frac{276}{1,1} = 250,5 \text{ МПа}$$

Конструкційна товщина в умовах експлуатації:

$$S_p^p = \frac{0,22 \cdot 1920}{2 \cdot 180 \cdot 0,9 - 0,22} = 1,31 \text{ мм}$$

Розрахункова товщина при гідротестуванні:

$$S_p^p = \frac{0,52 \cdot 1920}{2 \cdot 250,5 \cdot 0,9 - 0,52} = 2,21 \text{ мм}$$

Беремо більше з отриманих значень:

$$S = \max \{S_p^p; S_p^r\} = \max \{1,31; 2,21\} = 2,21 \text{ мм}$$

Прибавка:

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

где  $C_1$  – збільшення для компенсації корозії, ерозії, мм

$C_2$  – збільшення для компенсації негативного допуску товщини листа, мм

$C_3$  – прибавка для компенсації утонення листа при технологічних операціях: гідке, штамповке, мм

Прибавки:

$$C_1 = 0,5 \text{ мм}; C_2 = 0,8 \text{ мм}; C_3 = 0 \text{ мм}$$

$$\text{Тоді } C = 0,5 + 0,8 + 0 = 1,3 \text{ мм}$$

$$S \geq 2,21 + 1,3 = 3,61 \text{ мм}$$

З урахуванням необхідності забезпечення жорсткості шкаралупи беремо  $S = 6$  мм.

Тоді допустимий внутрішній тиск:

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21













$$l_{3R} = 18 \text{ мм}$$

Определяем расчетную ширину зоны укрепления в стенке сосуда

$$l_R = \min \{ l; 0,5 \cdot \sqrt{D_R \cdot (s - c)} \}$$

$$l_R = \min \{ 300; 0,5 \cdot \sqrt{3093 \cdot (6 - 1,3)} \} = 60 (\text{мм})$$

$$34 \cdot (5 - 0,07 - 1,3) + 14 \cdot (5 - 2 \cdot 1,3) + 180 \cdot (6 - 1,14 - 1,3) \geq 0,5 \cdot (216,4 - 51) \cdot 1,14$$

$$123,42 + 33,6 + 640,8 \geq 94,28$$

$$797,82 \geq 94,28$$

Укрепление отверстия произвели за счет избыточной толщины стенки сосуда.

## 7 Охрана труда

					К 04Б.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27













### *Література*

1. *Методичні рекомендації щодо виконання курсової роботи з дисципліна "Тепломасообмін" / Автора: В.М. Марченко, С.С. Мелейчук. – Суми: Узд-во СумГУ, 2006. – 29 с.*

2. *Холодильные машины: Учебник для Вузов / Н.Н. Кошкин, И.А. Сакун, Е.М. Бамбушек и др.; Под. Ред. И.А. Сакуна. – Л.: Машиностроение, 1985. – 510 с.*

					<i>К 04Б.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		33