

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра «Хімічної інженерії»

**Кваліфікаційна робота бакалавра
Зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»**

Тема роботи: Установка виробництва рідких азотних добрив. Розробити газорідинний реактор

Виконав:

Студент групи ХМ-91/1кі

Мандрика О.О.

прізвище та ініціали

залікова книжка

№ 19510040

Захищений з оцінкою:

Керівник:

д.т.н., проф. Ляпощенко О.О.

посада, прізвище та ініціали

підпис

СУМИ 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра хімічної інженерії

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"
Освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг обладнання хімічних виробництв"

Курс IV Група ХМ-91/1кі Семестр VIII

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Студент Мандрика Олександр Олександрович

1 Тема роботи: Установка виробництва рідких азотних добрив. Розробити газорідний реактор

2 Вихідні дані: проектна продуктивність установки за готовим продуктом - 15 т/годину, склад готового продукту: вода (H₂O) - 75% (масс.); аміак (NH₃) - 25 % (масс.)
Робочий тиск в апараті (надлишковий) – 0,4 МПа, температура контакту в апараті, не вище, – 50 °С, температура абсорбенту (води), що подається в апарат, не вище, – 20 °С
Строк служби апарату – 20 років. Питання до розділу «Охорона праці»: Фактори, що визначають наслідки ураження електричним струмом людини. Види уражень.

3 Перелік обов'язкового графічного матеріалу (аркуші А1):

1. Складальне креслення апарату – А2х3 арк.
2. Складальне креслення секції аміачного охолодження – А2 арк.
3. Технологічна схема установки отримання рідких азотних добрив – А2х2 арк.

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.

5 Етапи виконання курсового проекту:

Етапи і розділи проектування	ТИЖНІ				
	1,2	3–6	7–9	10–13	14
1 Вступ	хх				
2 Технологічна частина		хххх			
3 Розрахункова частина			ххх		
4 Розроблення креслень				хххх	
5 Оформлення записки					х
6 Захист роботи					х

6 Дата видачі завдання

березень 2023 р.

Керівник



підпис

д.т.н., проф. О.О.Ляпощенко

Зміст	
Вступ.....	5
1 Технологічна частина	7
1.1 Опис технологічної схеми установки	7
1.2 Теоретичні основи процесу	8
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів	12
2 Технологічні розрахунки процесу і апарату	18
2.1 Матеріальний та тепловий баланси процесу	18
2.2 Технологічні розрахунки	22
2.3 Конструктивні розрахунки апарата	37
2.4 Гідравлічний опір апарату	40
2.5 Вибір допоміжного обладнання	44
3. Розрахунки апарата на міцність та герметичність	54
3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки.....	54
3.2 Розрахунок зміцнення отворів.....	75
3.3 Розрахунок фланцевого з'єднання.....	77
3.4 Розрахунок опори апарата	96
4 Монтаж та ремонт апарата	103
4.1 Монтаж розробленого апарата.....	103
4.2 Ремонт апарата	103
5 Охорона праці [12]	108
Список літератури	110

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Мандрика</i>			<i>Пояснювальна записка до розрахунку трубчатого газорідного реактору</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ляпощенко</i>					4	111
<i>Н. Контр.</i>						<i>XM-91/1кі</i>		
<i>Чтв.</i>								

Вступ

Хімічна галузь пропонує ряд рідких азотних добрив, найпоширенішим з яких є саме аміак. Виробництво аміачної води на 30-40% дешевше, ніж виробництво твердих добрив, оскільки не виконуються такі технологічні операції, як гранулювання, сушіння, сортування та кондиціонування продукту. Вартість одиниці діючої речовини в аміачній воді в 1,5-2 рази дешевше аміачної селітри. Виробничі випробування показали, що трудовитрати, пов'язані з внесенням аміаку, зменшуються в 2-3 рази, оскільки для внесення не потрібна підготовка добрив, а всі операції (вантажно-розвантажувальні роботи, внесення) повністю є механізованими. Аміак NH_4OH - це 25% розчин аміаку в картриджі, який можна використовувати на будь-якому ґрунті та на всіх культурах за умови заглиблення в ґрунт на глибину 10-15 см. Азот в аміаку краще затримується в ґрунті, ніж азот амонійний у твердих добривах. Аміак можна використовувати для основного обробітку ґрунту, передпосівного обробітку та додаткового удобрення міжрядь.

Виробництво рідких азотних добрив на основі аміаку є актуальним в сучасних умовах з двох причин:

- По-перше, зростає попит на азотні добрива, особливо на ті, які містять аміак. Аміачна вода може бути використана як джерело аміаку для виробництва рідких азотних добрив, що робить цей процес ефективнішим та менш витратним.
- По-друге, виробництво рідких азотних добрив на основі аміачної води є екологічно безпечним способом, оскільки воно дозволяє зменшити кількість шкідливих викидів в атмосферу порівняно з традиційними методами виробництва азотних добрив.

Однією з основних одиниць обладнання установки з виробництва рідких азотних добрив є трубчастий реактор. Реактор трубчастий призначений для проведення технологічної операції додаткового насичення водного розчину аміаку та хімічної нейтралізації азотної та фосфорної кислот газоподібним аміаком.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

Реактор трубчастий, залежно від режиму роботи установки виробництва рідких азотних добрив (РАД), може виконувати різні функціональні завдання.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>6</i>

1 Технологічна частина

1.1 Опис технологічної схеми установки

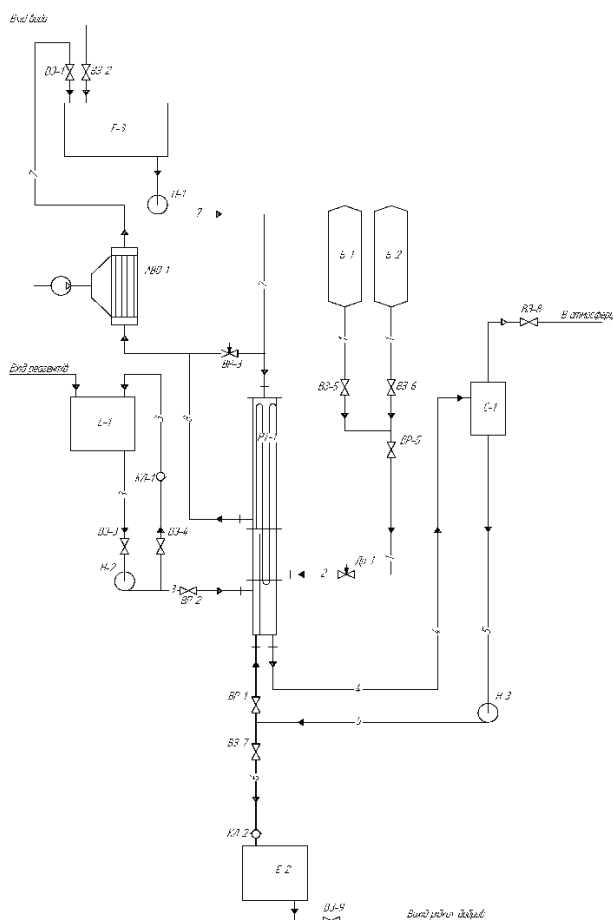


Рисунок 1.1 – Технологічна схема установки виробництва рідких азотних добрив

Вода поступає в ємність (Е-3) з входу 1, з якої насос (Н-1) транспортує рідину по трубопроводу з середовищем –7---7—(Вода холодна) де відбувається розділення потоку, частина води через регулювальний вентиль надходить до апарату повітряного охолодження, звідки знову поступає в ємність (Е-3), інша частина рідини надходить в трубчатий реактор, де вона нагрівається та надходить до апарату повітряного охолодження. Вхід реагентів відбувається через вхід 2, реагенти надходять в ємність (Е-1) з якої завдяки насосу (Н-2) кислота (--3---3--) надходить до реактору трубчатого (РТ-1). В реакторі трубчатому також надходить аміак з балонів (Б-1, Б-2) через дросель (Др-1). В результаті чого розчин насичується аміаком. Якщо відсутня необхідність додаткового насичення розчину аміаком, трубчастий реактор може бути відключений. При цьому готовий продукт (водний розчин аміаку) з абсорбера може бути спрямований безпосередньо на

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TGP.00.00.00 ПЗ

Лист

7

склад готової продукції через ємність (Е-2) або на додаткове охолодження теплообміннику холодильнику. З трубчатого реактору виходить паро- газова суміш надходить в сепаратор С-1 де частина виходить в атмосферу, а інша частина в вигляді рідких комплексних добрив надходить до парку (складу) готової продукції, а частина потоку у вигляді ретура (рециркуляційного потоку) повертається у основний технологічний цикл.

При роботі установки виробництва РАД в режимі одержання добрива азотовмісного на основі водного розчину аміаку реактор трубчастий може бути використаний для додаткового насичення розчину газоподібним аміаком та його охолодження. Експлуатація реактора трубчастого цьому режимі роботи установки дозволяє зняти частину теплового навантаження з абсорбційного обладнання, що дозволить отримувати готовий продукт заданого складу за несприятливих умов експлуатації обладнання (підвищена температура навколишнього середовища). Підтримка у реакторі вищого надлишкового тиску, ніж тиск в абсорбційних колонах, дозволить, при необхідності, підвищити кінцеву концентрацію аміаку в готовому розчині понад 25%. Кінцева концентрація перенасиченого таким чином розчину аміаку буде залежати від температури навколишнього середовища.

Якщо відсутня необхідність додаткового насичення розчину аміаком, реактор трубчастий може бути відключений. При цьому готовий продукт (водний розчин аміаку) з абсорбера може бути спрямований безпосередньо на склад готової продукції або на додаткове охолодження в теплообміннику холодильнику.

Основні вимоги до умов експлуатації трубчастого реактора

Робота реактора трубчастого супроводжується виділенням значного кількості теплової енергії, що зумовлює необхідність постійного відведення тепла. Для відведення теплової енергії необхідно організувати постійну подачу охолоджуючого реагенту, що має температуру не вище 30°C у відповідну порожнину реактора.

1.2 Теоретичні основи процесу

Газорідинний реактор – це багатофункціональний апарат, в якому

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

відбуваються процеси випаровування, масообміну, хімічна реакція, охолодження. Таким чином, процеси тепло-, масообміну та хімічні процеси взаємодіють в реакторі та визначають його продуктивність. Нижче наведені основні теоретичні основи цих процесів в реакторі.

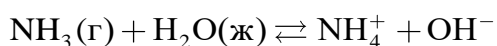
Процес теплообміну: У реакторах теплообмін зазвичай забезпечується за допомогою обмінників тепла. Зміна температури в реакторі може впливати на кінетику хімічної реакції та зміну стану реагентів та продуктів. Тому необхідно дотримуватись оптимальних температурних режимів для забезпечення ефективності реактора.

Процес масообміну: Масообмін в реакторі може відбуватись за допомогою конвекції, дифузії та механічної турбулентності. Цей процес є важливим, оскільки впливає на швидкість реакції та концентрації реагентів та продуктів. Важливо забезпечити оптимальний масообмін для досягнення максимальної ефективності реактора.

Хімічні реакції: Хімічні реакції в реакторі відбуваються за допомогою каталізаторів та відповідних реакційних умов. Кінетика реакції залежить від концентрації реагентів, температури та інших факторів. Важливо забезпечити оптимальні умови для хімічної реакції для досягнення максимальної ефективності реактора.

Взаємодія процесів тепло-, масообмінних і хімічних у реакторі може бути складною і нелінійною, тому її дослідження вимагає використання математичних моделей та чисельних методів. Моделі реакторів можуть бути одновимірними (залежними від часу або координати) або багатовимірними (залежні від більш ніж однієї координати).

У реактор надходить газоподібний аміак і вода. При взаємодії бульбашок газоподібного аміаку і води, частина аміаку розчиняється у воді.



Надходження тепла в реактор з рідким аміаком

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

$$Q'_{\text{NH}_3\text{ж}} = C_{\text{NH}_3\text{ж}} \cdot G_{\text{NH}_3} \cdot t_{\text{NH}_3},$$

де t_{NH_3} – температура аміаку на вході в кожух реактора

Тепло, що вноситься в систему з водою

$$Q'_{\text{H}_2\text{Oп}} = C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot t_{\text{H}_2\text{O}} \cdot G_{\text{H}_2\text{O}},$$

де $t_{\text{H}_2\text{Oп}}$ – температура води, що подається в систему

$C_{\text{H}_2\text{O}}$ – теплоємність води.

Теплота, що виділяється в процесі розчинення газоподібного аміаку воді

$$Q'_{\text{рNH}_3} = G_{\text{NH}_3} \cdot q_{\text{рNH}_3},$$

де G_{NH_3} – масова витрата газоподібного аміаку на виробництво продукту;

$q_{\text{рNH}_3}$ – питома теплота розчинення газоподібного аміаку у воді.

Відведення тепла з реактора

Теплота, що поглинається в реакторі за рахунок випаровування аміаку

$$Q''_{\text{и NH}_3} = G_{\text{NH}_3} \cdot r_{\text{NH}_3}$$

де r_{NH_3} – теплота випаровування аміаку, $r_{\text{NH}_3} = 1050 \text{ кДж/кг}$ [9]

Відведення тепла з готовим продуктом визначається за рівнянням

$$Q''_{\text{продукт1}} = G_{\text{продукт1}} \cdot C_{\text{продукт1}} \cdot t_{\text{кон}},$$

де $t_{\text{кон}}$ – кінцева температура готового продукту, що відводиться з реактора.

$C_{\text{продукт1}}$ – теплоємність готового продукту при температурі $t_{\text{кон}}$.

Витрату охолоджувальної води

$$G_{\text{о.в.}} = (\Sigma Q' - \Sigma Q'') / (C_{\text{о.в.}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}})),$$

де $C_{\text{о.в.}}$ – теплоємність охолоджувальної води.

Інтенсивність джерела (стоку) j -го компонента процесу масообміну дорівнює швидкості перенесення j -го компонента крізь одиницю площі поверхні контакту фаз[20]:

$$f_{\text{F},j} = W_{\text{m},j} = K_{\text{m}} \cdot \Delta c_j$$

де K_{m} – коефіцієнт масопереносу, м/с;

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>10</i>

Δc_j - рушійна сила процесу масообміну (відповідна різниці концентрацій j -го компонента), кмоль/м³.

Інтенсивність джерела (стоку) теплоти процесу масообміну дорівнює швидкості тепловиділення (поглинання тепла) при перебігу цього процесу (абсорбції, адсорбції, конденсації, кристалізації (+), або десорбції, випаровування, розчинення (-))[20]:

$$q_{F,T} = Q_{m,j} \cdot W_{m,j}$$

де $Q_{m,j}$ - тепловий ефект відповідного процесу масообміну, віднесений до 1 кмоль j -го компонента, кДж/кмоль.

Для ефективності реактора також важливо враховувати фізичні обмеження, такі як масштабування процесів, витрати енергії та економічні обмеження. Для досягнення максимальної ефективності реактора необхідно збалансувати різні фактори та забезпечити оптимальні умови для кожного з процесів.

Узагалі, процеси тепло-, масообмінні та хімічні грають важливу роль у функціонуванні реакторів, тому детальне розуміння та оптимізація цих процесів є важливим завданням для досягнення максимальної ефективності реактора.

Такий режим роботи реактора характерний спільною реакційною роботою та абсорбційного обладнання. При цьому не відбувається хімічних перетворень речовин, а реактор працює як додатковий рівень масообмінного обладнання.

Для більш ефективного насичення води аміаком рекомендується підтримувати температуру в робочому просторі реактор не більше 50°C.

Для забезпечення зниження навантаження на систему охолодження реактора конструкцією апарату передбачено система, при якій рідкий аміак, після дроселя, випаровується в кожусі реактора, поглинаючи тепло реакційної маси в робочому просторі реактора

Фізична модель взаємодії газоподібного аміаку з кислотами має такий вигляд:

- газоподібний аміак розподілений у рідині у вигляді бульбашок просувається по трубі реактора;

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

- на межі дотику газової та рідкої фази (плівка рідини навколо газового міхура) атоми аміаку дифундують у шар рідини;
- молекули аміаку в граничному (дифузійному) шарі розділу рідкої та газової фази вступають у хімічну взаємодію з молекулами азотної (або фосфорної) кислоти та утворюють молекули нітрату амонію (гідрофосфату амонію);
- продукти реакції відводяться від дифузійного шару в ядро рідкої фази рахунок конвективних потоків у шарі рідини;
- нові молекули кислоти надходять у дифузійний реакційний шар також рахунок циркуляційних потоків всередині рідкої фази;
- так як газова фаза складається в основному з аміаку, то в міру дифузії газу в рідину бульбашки повністю зникають.

Хімічні реакції нейтралізації азотної та фосфорної кислот газоподібним аміаком є реакція дифузійного типу [4, 5, 6]. Швидкість хімічних реакцій дифузійного типу визначається найбільш повільною стадією процесу фізико-хімічної взаємодії газоподібного аміаку розведеної азотної (фосфорної) кислоти. У нашому випадку найбільш повільною стадією процесу, що лімітує процес хімічного перетворення, є етап дифузії атомів аміаку в рідку фазу (розчинення аміаку) [1]. Тому з достатньою точністю для інженерного розрахунку можна прирівняти швидкість хімічної взаємодії газоподібного аміаку з азотною (фосфорною) кислотою до швидкості фізичної дифузії аміаку в рідину.

Розчинення аміаку у воді є хімічним процесом абсорбції швидкість якої лімітована швидкістю дифузії атомів аміаку з газового міхура через межу розділу фаз у шар рідини.

1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів

Основні технічні характеристики реактора трубчастого наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика реактора трубчастого

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

Апарат призначений для насичення розчину аміаком та нейтралізації кислоти газоподібним аміаком		
Найменування показника	Робочий простір	
	Міжтрубний	Трубний
1. Робочий тиск (абсолютний), МПа	0,3	0,4
2. Розрахунковий тиск, МПа	0,6	1,6
3. Максимально допустима робоча температура стінки, °С	70	70
4. Мінімально допустима температура стінки, °С	-60	-60
5. Розрахункова температура стінки, °С	70	70
6. Найменування середовища	вода	Аміак
7. Характеристики робочого середовища: - клас небезпеки (за ISO 129-1:1998) - пожежонебезпека (за ISO 45001:2018) - категорія вибухонебезпечності (за ДСТУ EN 60950-1:2015) - клас вибухонебезпечних сумішей (за ISO 14224:2016)	4 Ні - -	3 Так Іа Т1
8. Група апарату (за СОУ МВП 71.1202017 2009)	4	1
9. Строк придатності апарату, років	20	

Порівняння основних характеристик виробу з характеристиками аналогів

У сучасній промисловості для виробництва РАД використовуються реактори різних типів. Найбільш поширеною конструкцією реактора є реактор об'ємного типу з пристроєм, що перемішує [3]. Основними недоліками реактора об'ємного типу в порівнянні з проєктованим типом реактора є низька ефективність відведення теплової енергії, і наявність механічного приводу пристрою, що перемішує, що в свою чергу веде до додаткових енергетичних витрат на перемішування, використання дорогих елементів приводу мішалки [1, 2, 5]. Також для забезпечення функціонування установки виробництва РАД з реактором об'ємного типу з перемішувачем необхідно застосовувати каскад таких апаратів, що веде до суттєвого зростання витрат.

Для нейтралізації азотної кислоти аміаком у азотній промисловості знайшли широке застосування апарати ВТН (використання тепла нейтралізації) [9]. Апарати ВТН відрізняються високою продуктивністю та простою конструкцією. Відсутність пристроїв для відведення тепла від реакційної маси не дозволяє застосовувати апарат типу ВТН для виробництва рідких комплексних добрив (РКД).

Конструкція трубчастого реактора забезпечує можливість застосування як холодний теплоносії одночасно киплячого аміаку і оборотної охолоджувальної води, що дозволяє знизити теплове навантаження на систему водяного охолодження та виключити необхідність застосування додаткового обладнання для випаровування аміаку.

Проєктований апарат відноситься до реакційних апаратів безперервної дії з частковою рециркуляцією. Конструкція апарату представляє собою модульну збірну конструкцію, що складається з окремих секцій, що з'єднуються (трубних пучків і царг). Реактор трубчастий складається з наступних складових частин: камера розподільно-змішувальна 1, яка з'єднується з дифузійною трубчастою секцією 2. На дифузійну трубчасту секцію встановлюється аміачна холодильна секція 3 і далі секція водяного охолодження 4. Для кріплення апарату до рами служать опори лапи 5.

Камера змішувальна 1 являє собою конструкцію, що складається з

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

еліптичного днища, циліндричної обичайки, фланця та технологічних штуцерів.

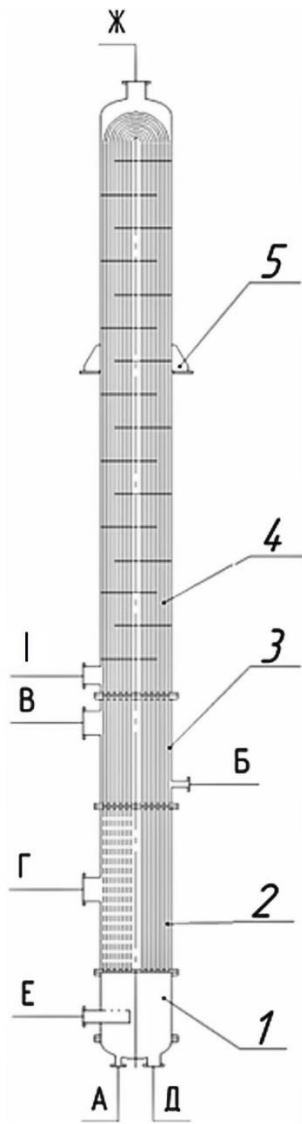
Дифузійна секція 2 являє собою трубчасту секцію з двома трубними ґратами. Трубний простір дифузійної секції, як і апарата в цілому має два ходи трубним простором. Труби прямого ходу дифузійної секції мають перфорацію, що дозволяє вводити газ у потік рідини.

Аміачна холодильна секція 3 являє собою пучок теплообмінних труб довжиною 1 м, жорстко закріплених у трубних ґратах. Міжтрубний простір аміачної холодильної секції має штуцера для входу рідкого аміаку та виходу пари.

Секція водяного охолодження є пучок U-подібних труб. довжиною на прямолінійних ділянках 5 м. У міжтрубному просторі секції встановлені сегментні перегородки. Секція має штуцера для входу та виходу охолоджуючої води.

Розрахунками на міцність і довговічність доведено можливість безпечної експлуатації реактора трубчастого за умови цільового використання пристрої в рамках встановлених даною пояснювальною запискою технологічних режимів. Зовнішня поверхня апарату на місці експлуатації повинна бути покрита теплоізоляцією, що запобігає можливості контакту персоналу з нагрітими частинами обладнання.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15



- 1 - камера розподільно-змішувальна;
- 2 – дифузійна секція;
- 3 – аміачна холодильна секція;
- 4 – секція водяного охолодження;
- 5 – опори.
- А – вхід кислоти на нейтралізацію;
- Б – вхід рідкого аміаку;
- В – вихід парів аміаку;
- Г – вхід пари аміаку;
- Д – вихід циркуляційної рідини;
- Е – вхід циркуляційної рідини;
- Ж - вхід охолодної води;
- І – вихід води, що охолоджує.

Рисунок 1.2 – Конструкція апарату, що проектується

У конструкції апарату широко застосовані стандартизовані та типові вузли та деталі: штуцера, фланці, трубні ґрати, днища, арматурні вироби.

Основними конструкційними матеріалами, що застосовуються при виготовленні трубчастого реактора є високолеговані і низьколеговані сталі. По закінченні терміну експлуатації практично всі вузли та деталі апарату можуть бути схильні до вторинної переробки.

Сталь 12Х18Н10Т – є стійкою до корозії та впливу хімічно активних сполук, має велику механічну міцність і легко обробляється. Оптимальне поєднання високих експлуатаційних якостей та доступної вартості дозволяє використовувати цей нержавіючий сплав у різних галузях.

Ізм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата

Розшифровка сталі 12Х18Н10Т

Конструкційна сталь, високої якості, вміст вуглецю 0.12%, масова частка хрому 18%, 10% нікелю та приблизно 1% титану. Нижче наведені характеристики сталі 12Х18Н10Т:

Таблиця 1.2– Фізичні властивості сталі 12Х18Н10Т

Фізичні властивості сталі 12Х18Н10Т						
Т (Град)	$E \cdot 10^{-5}$ (МПа)	$\alpha \cdot 10^6$ (1/Град)	λ (Вт/(м·град))	ρ (кг/м ³)	C (Дж/(кг·град))	$R \cdot 10^9$ (Ом·м)
20	1.98		15	7920		725
100	1.94	16.6	16		462	792
200	1.89	17	18		496	861
300	1.81	17.2	19		517	920
400	1.74	17.5	21		538	976
500	1.66	17.9	23		550	1028
600	1.57	18.2	25		563	1075
700	1.47	18.6	27		575	1115
800		18.9	26		596	
900		19.3				

Таблиця 1.3 – Механічні властивості сталі 12Х18Н10Т

Стандарт	Стан поставки, режими термообробки	Перетин, мм	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %
ISO 8741:2012	Прутки. Загартування 1020-1100 ° С, повітря, масло або вода.	60	196	510	40	55
ISO 11565:2013	Прутки шліфовані, оброблені на задану міцність. Прутки загартовані.	- До 5	- -	590-830 930	20 -	- -

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

XI.TTP.00.00.00 ПЗ

Лист

13

ISO 24511:2007 (Образцы поперечные)	Листи гарячекатані і холоднокатані: - гарт 1000-1080 °С, вода або повітря. - м 1050-1080 °С, вода або повітря. - загартовані	Св. 4 До 3,9 До 3,9	236 205 -	530 530 880-1080	38 40 10	- - -
ISO 15190:2014	Поковки. Загартування 1050-1100 °С, вода або повітря.	До 1000	196	510	35	40
ISO 607:2016	Дріт термооброблений.	1,0-6,0	-	540-880	20	-
ISO 683-1:2016	Труби безшовні гарячедеформовані без термообробки	3,5-32	-	529	40	-

Таблица 1.4 – Механічні властивості сталі 12Х18Н10Т при підвищених температурах

Механічні властивості сталі 12Х18Н10Т при підвищених температурах					
Температура випробувань, °С	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_b (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (кДж/см ²)
Загартування 1050-1100 °С, охолодження на повітрі					
20	225-315	550-650	46-74	66-80	215-372
500	352005	390-440	0-42	0-70	196-353
550	352005	380-450	1-41	1-68	215-353
600	202005	340-410	8-38	1-74	196-358
650	20-195	270-390	7-37	2-73	245-353
700	20-195	265-360	0-38	0-70	255-353

Таблица 1.5 – Механічні властивості 12Х18Н10Т при випробуваннях на тривалу міцність

Механічні властивості 12Х18Н10Т при випробуваннях на тривалу міцність (ISO 8741:2012)				
Температура пробування, °С	Межа в'язкості, МПа	Швидкість в'язкості %/год	Межа тривалої міцності, МПа, не менше	Тривалість пробування, год
600	74	1/100000	147	10000
650	29-39		78-98	

Таблиця 1.6 – Ударна в'язкість сталі 12Х18Н10Т КСУ, (Дж/см²)

Ударна в'язкість сталі 12Х18Н10Т КСУ, (Дж/см ²)			
T = +20 °С	T = -40 °С	T = -75 °С	Термообробка
286	303	319	Смуга 8x40 мм у стані спокою

Таблиця 1.7 – Чутливість сталі 12Х18Н10Т до крихкості при старінні

Чутливість сталі 12Х18Н10Т до крихкості при старінні		
Час, год	Температура, °С	КСУ, Дж/см
Початковий стан		274
5000	600	1862006
5000	650	176-196

Таблиця 1.8 – Жаростійкість сталі 12Х18Н10Т

Жаростійкість сталі 12Х18Н10Т		
Середа	Температура, °С	Група стійкості чи бал
Повітря	650	2-3
	750	4-5

Сталь марки 16ГС – конструкційна низьколегована сталь для зварних

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

конструкцій, що відповідає вимогам стандарту ДСТУ 8541.

Класифікація: Сталь конструкційна низьколегована для зварних конструкцій.

Продукція: Товстолистовий, широкосмуговий універсальний, сортовий і фасонний прокат, гнуті профілі.

Таблиця 1.9 – Хімічний склад сталі за аналізом ківшової проби відповідно до ДСТУ 8541, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,12 - 0,18	0,40 - 0,70	0,90 - 1,20	≤0,30	≤0,035	≤0,030	≤0,30	≤0,008	≤0,30	≤0,08

Таблиця 1.10 – Механічні властивості листового прокату зі сталі 16ГС відповідно до ДСТУ 8541

Клас міцності	Межа цінності σ_t , Н/мм ² , не менше	Тимчасовий опір σ_b , Н/мм ² , не менше	Відносне подовження, %, не менше
265	265	430	21
295	295	430	21
315	315	450	21

325	325	450	21
-----	-----	-----	----

Таблиця 1.11 – Межа плинності при підвищених температурах

Межа плинності, Н/мм ² , min при температурі випробування, °С					
200	250	300	350	400	450
245	225	196 (225*)	176	157	137

Примітка: Знак * означає, що контроль межі плинності при підвищених температурах з відповідними нормами проводять за погодженням виробника з замовником і вказують у замовленні.

Принцип дії трубчастого реактора

Кислота (азотна або фосфорна) надходить в апарат через штуцер А в змішувально-розподільну камеру, де змішується з циркуляційним потоком рідини, що надходить у камеру через штуцер - розподільник Е. Далі рідка суміш надходить у дифузійну секцію. Рідкий аміак після дроселювання надходить у міжтрубний простір аміачної холодильної секції, де кипить, відбираючи тепло від реакційної маси, що протікає в трубках. Парі аміаку відводяться через штуцер В. Зі штуцера У парі аміаку надходять у дифузійну секцію через штуцер Г, де через перфорацію в трубках змішуються з потоком рідини в трубках. Газоподібний аміак входить у хімічну взаємодію з кислотою, що міститься у рідині. Хімічна взаємодія відбувається з виділенням тепла, яке відводиться від реакційної маси в аміачній холодильній секції та секції водяного охолодження. При цьому парі аміаку повністю розчиняються у рідині. Маса, що прореагувала, відводиться з реактора через штуцер Д і прямує в сепаратор. Після відділення залишків газоподібного аміаку, частина рідини за допомогою насоса подається назад в реактор через штуцер А.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

2 Технологічні розрахунки процесу і апарату

2.1 Матеріальний та тепловий баланси процесу

Розрахунок матеріального балансу реактору

Розрахункові режими роботи реактору

Технічним завданням передбачена необхідність розробки реактору, можливість його функціонування в одному функціональному режимі з отриманням одного виду продукції.

Конструкцією реактору повинен бути передбачений режим донасичення 25% розчину аміаку газоподібним аміаком з одночасним охолодженням отриманого продукту. Технологічною схемою передбачена можливість підвищення тиску в робочому просторі реактору до 0,4 МПа. Готовий продукт – висококонцентрований розчин аміаку в воді.

Розрахункова схема реактору наведена на рис.2.1

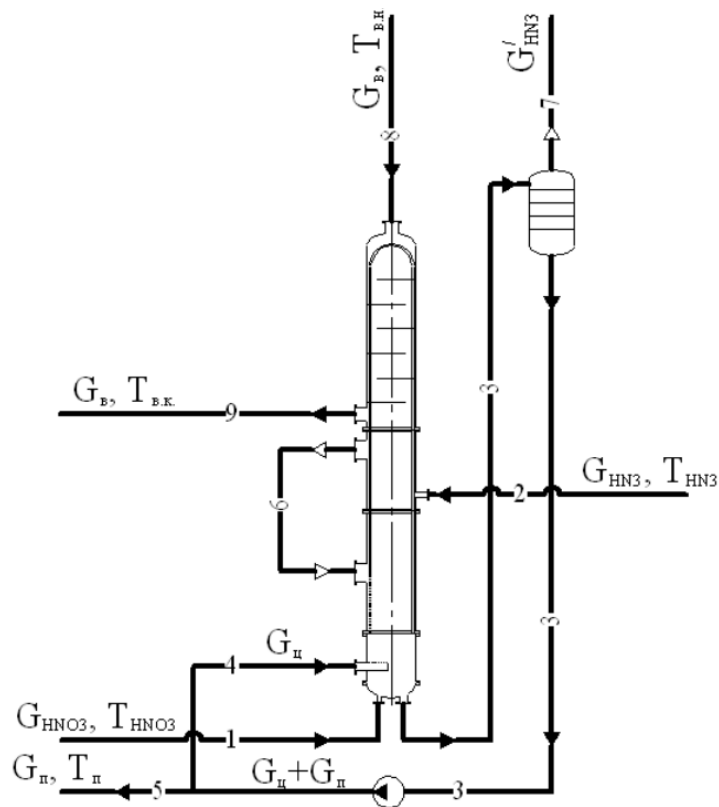


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема реактору

1 – рідкий аміак; 2– пари аміаку; 3 – введення кислоти; 4 – подача водного розчину аміаку з абсорбційного відділу; 5 – відведення готового продукту; 6 –

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TGP.00.00.00 ПЗ

Лист

18

циркуляційний розчин; 7 – розчин на сепарацію; 8 – подача охолоджуючої води; 9 – відведення охолоджуючої води.

Вихідні дані для розрахунку матеріального балансу

Продуктивність реактора - 15 т/год

Склад готового:

вода (H₂O) 75% (мас.);

аміак (NH₃) 25% (мас.).

Вихідна сировина для отримання:

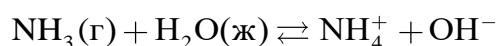
Вода 100% (мас.)

Аміак рідкий 100% (мас.)

Одним з функціональних режимів роботи реактора є режим, при якому реактор служить для донасичення води газоподібним аміаком, що надходить з абсорбційного відділення. У цьому режимі реактор функціонує одночасно у комплексі з абсорбційним відділенням. Тому розрахунок матеріального балансу наведено для комплексного режиму роботи реактора та абсорбційних колон.

У реактор подається газоподібний аміак, який змішується з водою, що надходить з абсорбційних колон. Частина аміаку, подаваного в реактор, розчиняється у воді, а частина сепарується і прямує в абсорбер. Готовий продукт складається з 25%(мас.) аміаку та 75%(мас.) води.

У цьому режимі у реактор надходить газоподібний аміак і вода. При взаємодії бульбашок газоподібного аміаку і води, частина аміаку розчиняється у воді.



Кількість газоподібного аміаку, необхідного для отримання однієї тони продукту:

$$G_{\text{NH}_3} = 1 \cdot (25/100) = 0,25 \text{ т}$$

Необхідна кількість води для розчинення аміаку

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \cdot (75/100) = 0,75 \text{ т}$$

Матеріальний баланс реактора для отримання 1 тони продукту наведений в

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

таблиці 2.1:

Таблиця 2.1 – Матеріальний баланс реактору для режиму на 1 тонну готового продукту

Вхідні потоки	т/т г.п.	Вихідні потоки	т/т г.п.
Аміак газоподібний (NH ₃)	0,25	Аміак в розчині (NH ₃ у поєднанні NH ₄ OH)	0,25
Вода (H ₂ O)	0,75	Вода (H ₂ O)	0,75
Всього	1,00	Всього	1,00

Розрахунок матеріального балансу роботи реактора в даному режимі для заданої продуктивності 15 т/год за готовим продуктом наведено в таблиці 2.2:

Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс реактора для даного режиму на задану продуктивність 15 т/год готового продукту:

Вхідні потоки	т/т г.п.	Вихідні потоки	т/т г.п.
Аміак газоподібний (NH ₃)	3,75	Аміак в розчині (NH ₃ у поєднанні NH ₄ OH)	3,75
Вода (H ₂ O)	11,25	Вода (H ₂ O)	11,25
Всього	15,00	Всього	15,00

Розрахунок теплового балансу реактора

Прихід тепла до системи

Надходження тепла в реактор з рідким аміаком

$$Q'_{\text{NH}_3\text{ж}} = C_{\text{NH}_3\text{ж}} \cdot G_{\text{NH}_3} \cdot t_{\text{NH}_3}, \quad (2.1)$$

де t_{NH_3} – температура аміаку на вході в кожух реактора, $t_{\text{NH}_3} = 20^\circ\text{C}$.

$$Q'_{\text{NH}_3\text{ж}} = 4,81 \cdot 20 \cdot 3,75 \cdot (1000 / 3600) = 100,2 \text{ кВт}$$

Тепло, що вноситься в систему з водою

$$Q'_{\text{H}_2\text{Oр}} = C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot t_{\text{H}_2\text{O}} \cdot G_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2.2)$$

де $t_{\text{H}_2\text{Oр}}$ – температура води, що подається в систему, $t_{\text{H}_2\text{O}} = 20^\circ\text{C}$.

					<i>XI, TTP, 00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

C_{H_2O} – теплоємність води при $t_{H_2O} = 20^\circ C$, $C_{H_2O} = 4,18$ кДж/(кг·К) [7].

$$Q'_{H_2O} = 11,25 \cdot (1000/3600) \cdot 4,18 \cdot 20 = 261,25 \text{ кВт}$$

Теплота, що виділяється в процесі розчинення газоподібного аміаку у воді

$$Q'_{pNH_3} = G_{NH_3} \cdot q_{pNH_3}, \quad (2.3)$$

де G_{NH_3} – масова витрата газоподібного аміаку на виробництво продукту;

q_{pNH_3} – питома теплота розчинення газоподібного аміаку у воді,

$$q_{pNH_3} = 1940 \text{ кДж/кг.}$$

$$Q'_{pNH_3} = (1000/3600) \cdot 3,75 \cdot 1940 = 2020,83 \text{ кВт}$$

Відведення тепла з реактора

Теплота, що поглинається в реакторі за рахунок випаровування аміаку

$$Q''_{iNH_3} = G_{NH_3} \cdot r_{NH_3} \quad (2.4)$$

де r_{NH_3} – теплота випаровування аміаку, $r_{NH_3} = 1050$ кДж/кг [9]

$$Q''_{iNH_3} = 3,75 \cdot (1000/3600) \cdot 1050 = 1093,75 \text{ кВт}$$

Відведення тепла з готовим продуктом розрахуємо за рівнянням

$$Q''_{\text{продукт1}} = G_{\text{продукт1}} \cdot C_{\text{продукт1}} \cdot t_{\text{кон}}, \quad (2.5)$$

де $t_{\text{кон}}$ – кінцева температура готового продукту, що відводиться з реактора.

$C_{\text{продукт1}}$ – теплоємність готового продукту при температурі $t_{\text{кон}}$. Розрахунок теплоємності готового продукту, що є рідкою сумішшю води і аміаку, виконуємо за допомогою ЕОМ.

$$C_{\text{продукт1}} = 4,37 \text{ кДж/ кг} \cdot \text{К}$$

$$Q''_{\text{продукт1}} = 15 \cdot (1000/3600) \cdot 4,37 \cdot 50 = 910,42 \text{ кВт}$$

Визначимо витрату охолоджувальної води

$$G_{\text{о.в.}} = (\Sigma Q' - \Sigma Q'') / (C_{\text{о.в.}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}})), \quad (2.6)$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

де $C_{o.v.}$ – теплоємність охолоджувальної води. При середній температурі води, що охолоджує $(30+45)/2=34^{\circ}\text{C}$ теплоємність води дорівнюватиме $C_{o.v.} = 4,17$ кДж/(кг·К) [7]

$$G_{o.v.} = (100,2 + 261,25 + 2020,83 - 1093,75 - 910,42) / (4,17 \cdot (45 - 30)) = 6 \text{ кг/с}$$

Тепловий баланс працюючого реактора наведено в таблиці 2.3:

Таблиця 2.3 – Тепловий баланс реактору

Вхідні потоки	кВт	Вихідні потоки	кВт
Рідкий аміак (NH_3)	100,20	Відвід тепла з готовим продуктом	910,42
Вода на розчинення (H_2O)	261,25	Відвід тепла за рахунок випаровування аміаку	1093,75
Теплота розчинення газоподібного аміаку $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	2020,83	Відвід тепла з охолоджуючою водою	378,11
Всього	2382,28	Всього	2382,28

2.2 Технологічні розрахунки

Розрахунок необхідної поверхні масопередачі

Поверхнею взаємодії фаз у трубчастому реакторі є сумарна поверхня газових бульбашок, що переміщуються в потоці рідини.

Масопередачу речовини (аміаку) з газового міхура в шар рідини розрахуємо за основним рівнянням масообміну:

$$W = K_{ж} \cdot F \cdot (C_* - C_B), \quad (2.7)$$

де $K_{ж}$ – коефіцієнт масопередачі;

F – сумарна поверхня контакту фаз;

C_B – кінцева об'ємно-масова концентрація аміаку в готовому продукті;

W – кількість речовини, що переходить з газової в рідку фазу.

Тоді поверхню масообміну визначимо за формулою:

$$F = \frac{W}{K_{\text{ж}} \cdot (C_* - C_{\text{в}})}, \quad (2.8)$$

де C_* – рівноважна об'ємно-масова концентрація аміаку в розчині.

$$F = \frac{1,04}{0,0004 \cdot (555,98 - 222,24)} = 7,8 \text{ м}^2$$

Рівноважну мольну концентрацію аміаку в розчині розрахуємо за законом Генрі.

$$x_* = \frac{P}{E}, \quad (2.9)$$

де E – коефіцієнт Генрі, $E=0,416$ МПа;

P – тиск газу в реакторі, $P=0,4$ МПа.

$$x_* = \frac{0,4}{0,416} = 0,9615 \frac{\text{кмоль NH}_3}{\text{кмоль см.}}$$

Об'ємно-масову рівноважну концентрацію аміаку в розчині знайдемо за рівнянням:

$$C_* = \frac{\rho_{\text{см}} \cdot M_{\text{а}} \cdot x_*}{M_{\text{см}}}, \quad (2.10)$$

де $M_{\text{а}}$ – молярна маса аміаку, $M_{\text{а}} = 17$ кг/моль;

$M_{\text{см}}$ – молярна маса суміші компонентів;

$\rho_{\text{см}}$ – густина суміші.

$$C_* = \frac{579,52 \cdot 17 \cdot 0,9615}{17,038} = 555,98 \frac{\text{кг NH}_3}{\text{м}^3}$$

Молярну масу суміші знайдемо за рівнянням:

$$M_{\text{см}} = M_{\text{а}} x_* + M_{\text{в}} (1 - x_*), \quad (2.11)$$

де $M_{\text{в}}$ – молярна маса розчинника, $M_{\text{в}} = 18$ кг/кмоль.

$$M_{\text{см}} = 17 \cdot 0,9615 + 18 \cdot (1 - 0,9615) = 17,038 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Густина суміші визначимо з рівняння:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_a \cdot x'_* + \rho_b \cdot (1 - x'_*), \quad (2.12)$$

де ρ_a та ρ_b – густина аміаку і розчинника відповідно,

$$\rho_a = 561,8 \text{ кг/м}^3, \rho_b = 998 \text{ кг/м}^3;$$

x'_* – відносна рівноважна масова концентрація аміаку.

$$\rho_{\text{см}} = 561,8 \cdot 0,959 + 998 \cdot (1 - 0,959) = 579,52 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Відносну масову концентрацію аміаку визначають за рівнянням:

$$x'_* = \frac{M_a}{M_{\text{см}}} \cdot x_*, \quad (2.13)$$

$$x'_* = \frac{17}{17,038} \cdot 0,9615 = 0,9594 \frac{\text{кг NH}_3}{\text{кг см}}$$

Кінцеву об'ємно-масову концентрацію аміаку в розчині знайдемо за рівнянням, враховуючи, що за умовами завдання, масова відносна концентрація аміаку у воді дорівнює 25% мас ($x' = 0,25 \text{ кг NH}_3/(\text{кг} \cdot \text{см})$).

$$C_b = \rho_{\text{см}} \cdot x', \quad (2.14)$$

$$C_b = 888,95 \cdot 0,25 = 222,24 \frac{\text{кг NH}_3}{\text{м}^3}$$

Густина суміші, що відповідає кінцевій концентрації аміаку в готовому продукті 25% (мас)

$$\rho_{\text{см}} = 561,8 \cdot 0,25 + 998 \cdot (1 - 0,25) = 888,95 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Оскільки хімічні процеси, що протікають у трубному реакторі, відносяться до хімічних реакцій дифузійного типу, а газова фаза містить 100% реагуючої речовини, то швидкість хімічного перетворення визначається швидкістю переходу аміаку з газової фази в рідку. При цьому з достатньою для інженерних розрахунків точністю, можна прийняти співвідношення $K_{\text{ж}} = \beta_{\text{ж}}$. Тобто коефіцієнт масопередачі дорівнюватиме коефіцієнту масовіддачі в рідкій фазі.

Поверхня масопередачі дорівнюватиме сумарній поверхні бульбашок газу.

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

$$F = \frac{6 \cdot V_{\text{см}} \cdot \varphi_{\Gamma}}{d_{\Pi}}, \quad (2.15)$$

де $V_{\text{см}}$ – об'єм газорідинної реакційної суміші (об'єм реактора);

d_{Π} – діаметр газових бульбашок;

φ_{Γ} – газовмісткі суміші.

Звідси можна визначити необхідний обсяг реактора $V_{\text{см}} = V_p$

$$V_p = \frac{F \cdot d_{\Pi}}{6 \cdot \varphi_{\Gamma}}, \quad (2.16)$$

Для розрахунку діаметр газових міхурів рекомендується приймати в діапазоні 1,5 – 6 мм [1]. Прийmemo діаметр пухирців $d_{\Pi} = 6$ мм.

$$V_p = \frac{7,79 \cdot 0,006}{6 \cdot 0,34} = 0,0224 \text{ м}^3$$

Коефіцієнт масопередачі для барботажного змішникового реактора визначимо за рівнянням:

$$K_{\text{ж}} = \beta_{\text{ж}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{D_{\text{ж}} \cdot u_{\Pi}}{d_{\Pi}} \right)^{1/2}, \quad (2.17)$$

де $D_{\text{ж}}$ – коефіцієнт дифузії аміаку в розчин $D_{\text{ж}} = 3,04 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$;

u_{Π} – відносна швидкість руху міхура.

$$K_{\text{ж}} = \beta_{\text{ж}} = \frac{2}{\sqrt{3,14}} \cdot \left(\frac{3,04 \cdot 10^{-9} \cdot 0,248}{0,006} \right)^{1/2} = 0,0004 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}$$

Для полідисперсних міхурових режимів відносна швидкість руху міхура визначимо за рівнянням:

$$u_{\Pi} = 1,5 \left(\sigma \cdot g \cdot \frac{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma})}{\rho_{\text{ж}}^2} \right)^{0,25}, \quad (2.18)$$

де σ – поверхневий натяг рідини, $\sigma = 0,068 \text{ Н/м}$;

$\rho_{\text{ж}}$ – густина рідини, $\rho_{\text{ж}} = 888,95 \text{ кг/м}^3$

ρ_{Γ} – густина газу в робочих умовах.

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

$$u_{II} = 1,5 \left(0,068 \cdot 9,81 \cdot \frac{(888,95 - 2,57)^{0,25}}{888,95^2} \right) = 0,24 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Густина газу за робочих умов знайдемо за формулою:

$$\rho_r = \frac{M_a}{22,4} \cdot \frac{P}{0,1} \cdot \frac{273}{(t + 273)}, \quad (2.19)$$

де t – температура у робочій зоні реактора, $t = 50^\circ\text{C}$;

P – абсолютний тиск у реакторі, $P = 0,4 \text{ МПа}$.

$$\rho_r = \frac{17}{22,4} \cdot \frac{0,4}{0,1} \cdot \frac{273}{(50 + 273)} = 2,56 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Газовміст суміші розрахуємо за формулою:

$$\varphi_r = 1 - \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \phi, \quad (2.20)$$

де κ_1 та κ_2 – коефіцієнти враховуючі вплив на газовміст діаметру та висоти колони, для промислових апаратів приймаємо $\kappa_1=1$, $\kappa_2=1$.

$$\varphi_r = 1 - 1 \cdot 1 \cdot 0,652 = 0,348$$

Величина ϕ визначається з рівняння:

$$\phi = 1 - \exp \left[- \frac{0,2 \cdot \frac{w_r}{u_{II}} \cdot \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \right)^{0,2}}{1 + 0,00875 \cdot \left(\frac{w_r}{u_{II}} \right)^{0,95} \cdot \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \right)^{0,75}} \right], \quad (2.21)$$

де w_r – приведена швидкість газу.

$$\phi = 1 - \exp \left[- \frac{0,2 \cdot \frac{9,77}{0,248} \cdot \left(\frac{888,95}{2,57} \right)^{0,2}}{1 + 0,00875 \cdot \left(\frac{9,77}{0,248} \right)^{0,95} \cdot \left(\frac{888,95}{2,57} \right)^{0,75}} \right] = 0,652$$

Попередньо приймаємо реактор трубчастий з наступними параметрами трубчатки:

- діаметр кожуха $D_k = 600 \text{ мм}$;
- зовнішній діаметр реакційних труб $d_n = 25 \text{ мм}$;
- товщина стінки реакційної труби $\delta = 2 \text{ мм}$;

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

- кількість ходів по трубному простору 2;
- число реакційних труб в трубному пучку 240;
- число труб в одному ході $z_r = 240$ шт.

Приведена швидкість газу це об'ємна витрата газу, віднесений до перетину труби реактору:

$$w_r = \frac{4 \cdot V_r}{\pi \cdot d_r^2 \cdot z_r}, \quad (2.22)$$

де V_r – об'ємна витрата газу;

d_r – внутрішній діаметр труб реактора, $d_r = 21$ мм;

z_r – кількість труб у пучку.

$$w_r = \frac{4 \cdot 0,406}{3,14 \cdot 0,021^2 \cdot 120} = 9,773 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Об'ємну витрату газу визначимо із співвідношення:

$$V_r = \frac{G_r}{\rho_r}, \quad (2.23)$$

де G_r – масова витрата аміаку $G_r = G_{\text{МНЗ}} = 1,04$ кг/с.

$$V_r = \frac{1,04}{2,56} = 0,406 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Розрахункова площа поперечного перерізу реактора для визначається за співвідношенням:

$$S_p = \frac{V_{\text{ж}}}{u_{\text{ж}}}, \quad (2.24)$$

де $u_{\text{ж}}$ – швидкість рідини в реакторі;

$V_{\text{ж}}$ – об'ємна витрата рідини.

Для промислових реакторів рекомендована швидкість руху середовища приймається в діапазоні $u_{\text{ж}} = 0,4 - 2,5$ м/с [1].

$$S_p = \frac{0,0035}{0,4} = 0,00879 \text{ м}^2$$

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

Об'ємну витрату рідини в реакторі визначають із рівняння:

$$V_{\text{ж}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}, \quad (2.25)$$

де $G_{\text{ж}}$ – масова витрата рідини, $G_{\text{ж}} = G_{\text{H}_2\text{O}} = 3,125 \text{ кг/с}$.

$$V_{\text{ж}} = \frac{3,125}{888,95} = 0,00352 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Сумарну довжину реакційної зони визначимо за формулою:

$$L_{\text{р}} = \frac{4 \cdot V_{\text{р}}}{\pi \cdot d_{\text{т}}^2 \cdot z_{\text{т}}}. \quad (2.26)$$

$$L_{\text{р}} = \frac{4 \cdot 0,0224}{3,14 \cdot 0,021^2 \cdot 120} = 0,54 \text{ м}$$

Для зменшення довжини реакторних труб та оптимізації співвідношення витрати рідини і газу в реакційних трубах необхідно застосувати рециркуляцію потоку рідини.

Площа поперечного перерізу трубного пучка для рециркуляційного режиму дорівнюватиме:

$$S_{\text{ц.р.}} = \left(\frac{V_{\text{ж}} + V_{\text{ц}}}{V_{\text{ж}}} \right) \cdot S_{\text{р}}, \quad (2.27)$$

де $V_{\text{ц}}$ – об'ємна витрата рідини у циркуляційному контурі.

$$S_{\text{ц.р.}} = \left(\frac{0,00352 + 0,0127}{0,00352} \right) \cdot 0,00879 = 0,0404 \text{ м}^2$$

Циркулюючий об'єм рідини в реакторі:

$$V_{\text{ц}} = V_{\text{ж}} \cdot K_{\text{ц}}, \quad (2.28)$$

де $K_{\text{ц}}$ – коефіцієнт циркуляції, що показує як співвідносяться циркулюючий і основний потоки, $K_{\text{ц}} = 3,6$.

$$V_{\text{ц}} = 0,00352 \cdot 3,6 = 0,0127 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Тоді необхідну розрахункову кількість труб знайдемо за рівнянням:

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

$$z_T = \frac{4 \cdot S_{ц.р}}{\pi \cdot d_T^2}, \quad (2.29)$$

де d_T – внутрішній діаметр труби, $d_{Т.В.} = 0,021$ м

$$z_T = \frac{4 \cdot 0,0404}{3,14 \cdot 0,021^2} = 116,7 \text{ шт.}$$

Прийняті раніше параметри трубчастого реактора відповідають розрахунковим.

Уточнена приведена швидкість рідини в реакторі:

$$u_{ж} = \frac{4 \cdot (V_{ж} + V_{ц})}{\pi \cdot d_{Т.В.}^2 \cdot z_T}, \quad (2.30)$$

$$u_{ж} = \frac{4 \cdot (0,00352 + 0,01266)}{3,14 \cdot 0,021^2 \cdot 120} = 0,389 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Розрахунок теплообміну у реакторі

Для забезпечення відведення тепла та підтримки постійної температури в реакційній зоні апарату передбачено зовнішню водяну сорочку.

Необхідну поверхню теплообміну визначимо з основного рівняння теплопередачі:

$$F = F_1 + F_2 = \frac{Q_B}{K_B \cdot \Delta t_{ср.В}} + \frac{Q_a}{K_a \cdot \Delta t_{ср.а}}, \quad (2.31)$$

де Q_B – тепловий потік, що відводиться від реактора охолоджувальною водою;

Q_a – тепловий потік відбирається від реакційної маси аміаком, що випаровується;

K_B – коефіцієнт тепловіддачі від реакційної суміші до охолоджувальної води;

K_a – коефіцієнт теплопередачі від реакційної маси до киплячого аміаку;

$\Delta t_{ср. в}$ – середня рушійна сила теплообміну між реакційною масою та охолоджувальною водою;

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

$\Delta t_{cp. a}$ – середня рушійна сила теплообміну між реакційною масою та киплячим аміаком.

Середню рушійну силу теплообмінного процесу визначимо як середньологарифмічну різницю температур.

Середній температурний напір

Середній температурний напір для зони реактора, що охолоджується водою, визначимо відповідно до температурної схеми (рисунок 2.2)

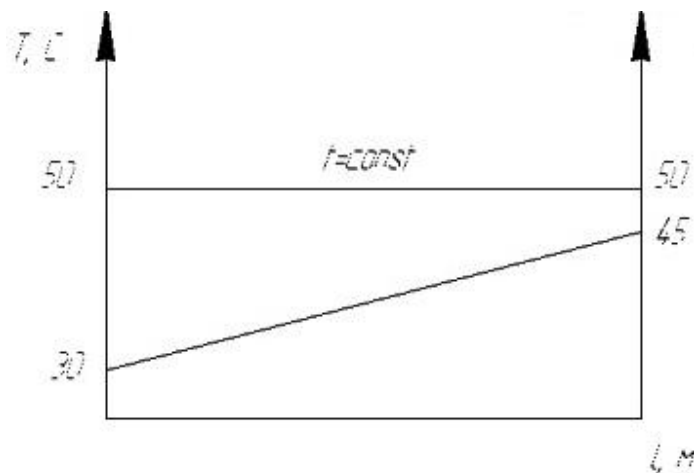


Рисунок 2.2 – Температурна схема процесу теплообміну;

Середню рушійну силу теплообміну визначимо за рівнянням:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (2.32)$$

де Δt_6 , Δt_m – більша та менша різниця температур на різних кінцях реактору.

Середня рушійна сила процесу теплообміну буде дорівнювати:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(50 - 30) - (50 - 45)}{\ln \frac{(50 - 30)}{(50 - 45)}} = 10,82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Визначення коефіцієнта теплопередачі

Коефіцієнт теплопередачі визначимо за рівнянням:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.33)$$

де α_1 та α_2 – відповідно коефіцієнт тепловіддачі з боку реакційної газорідинної маси і з боку охолоджуючого реагенту (киплячий аміак, вода);

$\delta_{тр}$ – товщина стінки реактора;

$\lambda_{тр}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки труби.

Визначення коефіцієнта тепловіддачі від реакційної маси до стінки реактора.

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{ж} \cdot \rho_{ж}}{\mu_{ж}} \cdot u_* \cdot \frac{Pr}{\psi}, \quad (2.34)$$

де $\lambda_{ж}$ – коефіцієнт теплопровідності рідини, $\lambda_{ж} = 0,548$ Вт/(м·К);

$\mu_{ж}$ – Коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, $\mu_{ж} = 0,000363$ Па·с;

u_* – динамічна швидкість;

$\frac{Pr}{\psi}$ – числовий комплекс, що є співвідношенням критерію Прандтля і

безрозмірного температурного напору.

$$\alpha_1 = \frac{0,5475 \cdot 888,95}{0,000363} \cdot 0,1217 \cdot 0,04 = 6473,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Динамічна швидкість визначається відповідно до виразу:

$$u_* = 1,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu_{ж} \cdot g \cdot u_{от} \cdot \varphi_{г} \cdot (1 - \varphi_{г})^2}{\rho_{ж}}}, \quad (2.35)$$

де $u_{от}$ – відносна швидкість газу.

$$u_* = 1,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,000363 \cdot 9,81 \cdot 27,49 \cdot 0,348 \cdot (1 - 0,348)^2}{888,95}} = 0,12 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Відносна швидкість газу:

$$u_{от} = \frac{w_{г}}{\varphi_{г}} - \frac{w_{ж}}{1 - \varphi_{г}}, \quad (2.36)$$

$$u_{от} = \frac{9,77}{0,348} - \frac{0,389}{1 - 0,348} = 27,49 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Комплекс Pr/ψ визначаємо за графіком (рисунок 2.3) залежно від значень

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

критерію Прандтля Pr , коефіцієнта η_{\max} .

$$\eta_{\max} = 2,2 \cdot (1 - \varphi_r)^{1/2} \cdot K_6^{1/4} \cdot \frac{y}{l_{\text{сл}}}, \quad (2.37)$$

де K_6 – критерій режиму барботажу;

y – відстань від стінки до ядра потоку;

$l_{\text{сл}}$ – масштаб товщини пристінного шару.

Для трубчастого реактора рекомендується величину y приймати рівною:

$$y = 0,5 \cdot d_{\text{тр}}. \quad (2.38)$$

$$\eta_{\max} = 2,2 \cdot (1 - 0,348)^{1/2} \cdot 615,34^{1/4} \cdot \frac{0,0105}{2,57 \cdot 10^{-5}} = 3613,25$$

Критерій Прандтля визначимо із залежності:

$$Pr = \frac{c_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad (2.39)$$

$$Pr = \frac{4,37 \cdot 10^3 \cdot 0,000363}{0,548} = 2,9$$

Критерій режиму барботажу обчислимо за рівнянням:

$$K_6 = \frac{w_r}{\left(\frac{\mu_{\text{ж}} \cdot g}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{1/3}}, \quad (2.40)$$

$$K_6 = \frac{9,77}{\left(\frac{0,000363 \cdot 9,81}{888,95} \right)^{1/3}} = 615,34$$

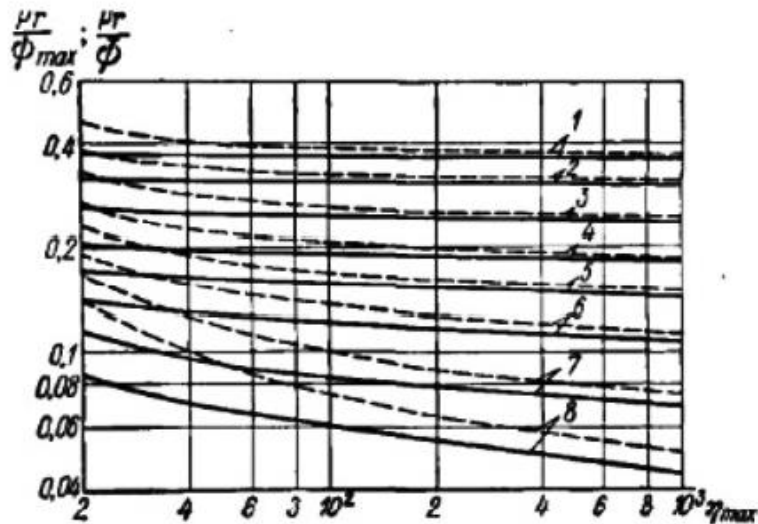


Рисунок 2.3 – Залежність комплексу Pr/Ψ від безрозмірного коефіцієнта η при

значення критерію Прандтля:

1 – $Pr = 160$; 2 – $Pr = 80$; 3 – $Pr = 40$; 4 – $Pr = 20$;

5 – $Pr = 10$; 6 – $Pr = 5$; 7 – $Pr = 2,5$; 8 – $Pr = 1$.

Масштаб товщини пристінного шару для трубчастих реакторів:

$$l_{сл} = \left(\left(\frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж}} \right)^2 \cdot \frac{1}{g} \right)^{1/3}, \quad (2.41)$$

$$l_{сл} = \left(\left(\frac{0,000363}{888,95} \right)^2 \cdot \frac{1}{9,81} \right)^{1/3} = 2,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Визначення коефіцієнта тепловіддачі від стінки реактора до киплячого аміаку

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячого аміаку:

$$\alpha_2 = b^3 \frac{\lambda_{ж}^2 \cdot \rho_{ж} (t_{ст} - t_{кип})^2}{\mu_{ж} \cdot \sigma \cdot (273 + t_{кип})}, \quad (2.42)$$

де b – безрозмірна функція;

$t_{ст}$ – температура стінки, попередньо приймаємо $t_{ст} = 8,7^\circ\text{C}$

$t_{кип}$ – температура кипіння, $t_{кип} = -2,05^\circ\text{C}$ при тиску 0,4 МПа;

$\mu_{ж}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідкого аміаку, $\mu_{ж} = 0,000189 \text{ Па}\cdot\text{с}$;

$\lambda_{\text{ж}}$ – теплопровідність аміаку, $\lambda_{\text{ж}} = 0,558 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;

$\rho_{\text{ж}}$ – густина рідкого аміаку, $\rho_{\text{ж}} = 650 \text{ кг/м}^3$;

σ – поверхневий натяг рідкого аміаку, $\sigma = 0,0268 \text{ Н/м}$.

$$\alpha_2 = 0,096^3 \frac{0,558^2 \cdot 650(8,7 - (-2,05))^2}{0,000189 \cdot 0,0286 \cdot (273 + (-2,05))} = 14184,69 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Безрозмірний коефіцієнт b розраховуємо за формулою:

$$b = 0,075 + 0,75 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}} \right)^{2/3}, \quad (2.43)$$

де $\rho_{\text{п}}$ – густина парів аміаку в робочих умовах.

$$b = 0,075 + 0,75 \cdot \left(\frac{3,06}{650 - 3,06} \right)^{2/3} = 0,096$$

Густина парів аміаку в робочих умовах:

$$\rho_{\text{г}} = \frac{17}{22,4} \cdot \frac{0,4}{0,1} \cdot \frac{273}{(-2,05 + 273)} = 3,06 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Уточнену температуру стінки визначимо із співвідношення:

$$q = \frac{Q_a}{F} = \alpha_2 \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{кип}}), \quad (2.44)$$

$$t_{\text{ст}} = \frac{Q_a}{\alpha_2 \cdot F} + t_{\text{кип}}, \quad (2.45)$$

де Q_a – тепловий потік, що поглинається аміаком.

$$t_{\text{ст}} = \frac{1093,75 \cdot 10^3}{14184,69 \cdot 7,13} + (-2,05) = 8,77^\circ\text{C}$$

Поверхня теплообміну для ділянки реактора, що охолоджується аміаком, визначимо за формулою:

$$F_2 = \frac{Q_a}{K_a \cdot \Delta t_a} \quad (2.46)$$

де K_a – коефіцієнт теплопередачі для зони охолодження аміаком;

Δt_a – рушійна сила теплообміну в зоні охолодження аміаком.

$$F_2 = \frac{1093,75 \cdot 10^3}{2947,6 \cdot 52,05} = 7,13 \text{ м}^2$$

Температура випаровування аміаку залишається постійною.

Рушійна сила теплообміну для зони охолодження аміаком:

$$\Delta t_a = t_p - t_{\text{кип}}, \quad (2.47)$$

де t_p – температура в реакційному просторі, $t_p = 50^\circ\text{C}$.

$$\Delta t_a = 50 - (-2,05) = 52,05^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт теплопередачі від реакційної маси до киплячого аміаку при товщині теплообмінної стінки $\delta_{\text{ст}} = 0,002$ м, та теплопровідності матеріалу реакційної труби $\lambda_{\text{ст}} = 17,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{6473,7} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{14184,7}} = 2947,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Уточнена температура стінки $t_{\text{ст}} = 8,77^\circ\text{C}$, не значно відрізняється від попередньо прийнятої $8,7^\circ\text{C}$.

Визначення коефіцієнта тепловіддачі від стінки реактора до охолоджуючої води

Визначимо критерій Нусельта для режиму тепловіддачі від реакційних труб до охолоджуючої води:

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43}, \quad (2.48)$$

де Re – критерій Рейнольдса для охолоджувальної води;

Pr – критерій Прандтля для охолоджувальної води.

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot 6849^{0,8} \cdot 4,14^{0,43} = 45,3$$

Критерій Рейнольдса для потоку охолоджувальної води

$$\text{Re} = \frac{w_B \cdot D_r \cdot \rho_B}{\mu_B}, \quad (2.49)$$

де D_r – гідравлічний діаметр;

w_B – швидкість охолоджувальної води;

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

ρ_B – густина води, $\rho_B = 998 \text{ кг/м}^3$;

μ_B – коефіцієнт динамічної в'язкості води, $\mu_B = 0,00062 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

$$\text{Re} = \frac{0,17 \cdot 0,025 \cdot 998}{0,00062} = 6849$$

Для міжтрубного простору реактора маючого перегородки:

$$D_r = d_{\text{н.т.}} = 0,025 \text{ м}, \quad (2.50)$$

де $d_{\text{н.т.}}$ – зовнішній діаметр реакційної труби.

Швидкість води у кожусі реактора:

$$w_B = \frac{4 \cdot G_B}{\pi \cdot \rho_B \cdot S_{\text{сеч}}}, \quad (2.51)$$

де $S_{\text{сеч}}$ – площа поперечного перерізу одного ходу на міжтрубному просторі кожуху апарату.

Для кожухотрубчастого реактору з діаметром кожуха 600 мм та трубами 25x2 мм площа поперечного перерізу ходу в міжтрубному просторі складе $S_{\text{сеч}} = 4,5 \cdot 10^{-20} \text{ м}$.

$$w_B = \frac{4 \cdot 6}{3,14 \cdot 998 \cdot 0,045} = 0,17 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Критерій Прандтля визначимо із співвідношення:

$$\text{Pr} = \frac{c_B \cdot \mu_B}{\lambda_B}, \quad (2.52)$$

де λ_B – теплопровідність води, $\lambda_B = 0,625 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

$$\text{Pr} = \frac{4,17 \cdot 10^3 \cdot 0,00062}{0,625} = 4,14.$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_B}{D_r} \quad (2.53)$$

$$\alpha_2 = \frac{45,3 \cdot 0,625}{0,025} = 1131,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

Коефіцієнт теплопередачі для зони трубчастого реактора, що охолоджується водою:

$$K_B = \frac{1}{\frac{1}{6473,7} + \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{1131,9}} = 867,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Тоді необхідна поверхня теплопередачі для зони водяного охолодження реактора:

$$F_2 = \frac{378,11 \cdot 10^3}{867,9 \cdot 10,82} = 40,3 \text{ м}^2$$

2.3 Конструктивні розрахунки апарата

Розрахунок секції газорозподільного пристрою

Газорозподільний пристрій трубчастого реактора представляє собою окрему трубчасту секцію, де в трубах прямого ходу виконані отвори. Газ надходить у міжтрубний простір дифузійної секції, потрапляє в отвори в трубах, де змішується з потоком рідини. Для забезпечення якісного перемішування газового та рідкого потоків необхідно забезпечити бульбашковий режим барботера. Для цього швидкість газу в отворах барботера не повинна перевищувати швидкість руху окремих бульбашок, що запобігає утворенню газових струменів.

Розрахуємо параметри дифузійної секції реактора

Діаметр отворів газорозподільного пристрою для забезпечення бульбашок заданого розміру визначимо за рівнянням:

$$d_o = \frac{1}{6} \cdot \frac{\rho_{ж} - \rho_{г} \cdot d_{п}^3 \cdot g}{\sigma}, \quad (2.54)$$

$$d_o = \frac{1}{6} \cdot \frac{(888,95 - 2,56) \cdot 0,006^3 \cdot 9,81}{0,068} = 0,0046 \text{ м}$$

Необхідну кількість отворів у газорозподільному каналі знайдемо за рівнянням:

$$Z_{\text{отв.}} = \frac{V_{г}}{V_{\text{окр}}}, \quad (2.55)$$

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

де $V_{\text{окр}}$ – критична витрата газу з одного отвору, відповідна бульбашковому режиму роботи газорозподільного пристрою.

$$Z_{\text{отв.}} = \frac{0,406}{4,67 \cdot 10^{-6}} = 86861 \text{ отв.}$$

Критична витрата газу через один отвір барботера становить:

$$V_{\text{окр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{п}}^2}{6} \cdot u_{\text{п}} \quad (2.56)$$

$$V_{\text{окр}} = \frac{3,14 \cdot 0,006^2}{6} \cdot 0,248 = 4,67 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

На одному метрі труби $\varnothing 25 \times 2$ мм можливо розмістити 1440 отв. Діаметром 4 мм з кроком 8 мм. З рахунком, що кількість труб в пучці підходящих для введення газу 120 шт. отримуємо, що на одному погонному метрі трубного пучка можливо розмістити $1440 \cdot 120 = 172800$ отв.

Тоді необхідна активна довжина газорозподільної секції, при максимально необхідній розрахунковій кількості отворів 86861 шт., складе:

$$L_a = Z_{\text{отв.}} / 172800, \quad (2.57)$$

$$L_a = 86861 / 172800 = 0,503 \text{ м.}$$

Приймаємо довжину дифузійної секції трубчастого реактору 0,5 м.

Визначення довжини реакційних секцій

Розрахунковим параметрам масо- та теплопередачі в трубчастому реакторі, що підтверджено розрахунками вище, відповідає реактор з наступними параметрами трубного пучка:

- діаметр кожуха - 600мм;
- діаметр реакційних труб 25x2 мм;
- кількість ходів трубним простором 2;
- число труб в одному ході 120 шт.

Конструктивно реактор розділений на два окремі трубні пучки, з'єднані

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

послідовно. В одному трубному пучку відбувається охолодження реакційної маси водою, а в другому – киплячим аміаком. Необхідну довжину трубчатки для кожної зони визначимо за формулою:

$$H = \frac{F}{\pi \cdot d_{cp} \cdot z_{II}}, \quad (2.58)$$

де d_{cp} – середній діаметр реакційної труби, $d_{cp} = 25 - (2 \cdot 2) = 21$ мм.

Розрахуємо мінімально необхідну довжину трубчатки

Зона охолодження киплячим аміаком:

$$H = \frac{7,12}{3,14 \cdot 0,021 \cdot 240} = 0,41 \text{ м}$$

Зона реактору, що охолоджується водою:

$$H = \frac{40,26}{3,14 \cdot 0,021 \cdot 240} = 2,32 \text{ м}$$

Прийmemo довжину трубчатки, з урахуванням запасу поверхні теплообміну, для зони охолодження аміаком 1 м, для зони охолодження водою 5 м. Прийняті параметри трубчастого реактора відповідають усім розрахунковим параметрам реактора за всіх режимів експлуатації.

Розрахунок діаметра штуцерів

Діаметр технологічного штуцера апарату розрахуємо із співвідношення:

$$d_{шт} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (2.59)$$

де G – масова витрата середовища через штуцер;

ρ – густина речовини, що проходить через штуцер;

w – рекомендована швидкість потоку у трубопроводі.

Уточнену швидкість потоку в трубопроводі обчислимо за рівнянням:

$$w = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot d_{шт}^2}. \quad (2.60)$$

Результати розрахунку технологічних штуцерів для всіх режимів функціонування реактора наведено в таблиці 2.4:

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Таблиця 2.4 – Розрахункові параметри штуцерів

Призначення штуцера	Мас. Витрата, кг/с	Об'єм. витрата м ³ /с	Густина серед. кг/м ³	Реак. Швидкість м/с	Розр. діаметр м	Прин. діаметр	Уточн. швид. м/с
Вхід рідкого аміаку	1,04	0,002	561,8	2	0,034	0,051	1
Вихід (вхід) парів аміаку	1,04	0,406	2,6	15	0,186	0,207	12,1
Вхід (вихід) циркуляційної рідини	14,38	0,016	888,9	2	0,101	0,1	2,1
Вхід води	3,13	0,003	998	2	0,045	0,051	1,5
Вхід (вихід) охолоджуючої води	6	0,006	998	2	0,062	0,15	0,3

2.4 Гідравлічний опір апарату

Повний гідравлічний опір трубного простору реактора можна визначити за формулою:

$$\Delta p = \Delta p_{ст} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{уск} + \sum \Delta p_m, \quad (2.61)$$

де $\Delta p_{ст}$ – статичний тиск газорідинної суміші;

$\Delta p_{тр}$ – втрати тиску на тертя об стінку труби при низхідному та висхідному потоці;

$\Delta p_{уск}$ – тиск, необхідний для прискорення газорідинного потоку при зміні напрямку течії.

$\sum \Delta p_m$ – сума втрат на місцеві опори у калачах.

$$\Delta p = 29912,5 + 11414,33 + 91,06 + 15278,8 = 56696,5 \text{ Па}$$

Перепад статичних тисків $\Delta p_{ст}$ в апараті викликаний не тільки підйомом рідини на висоту, приблизно рівну довжині труб, а й різницею густин газорідинних сумішей у висхідному та низхідному потоках.

$$\Delta p_{ст} = \rho_{ж} \cdot g \cdot H \cdot [z_{вс} \cdot (1 - \varphi_{вс}) - z_{нс} \cdot (1 - \varphi_{нс})], \quad (2.62)$$

де H – висота труб;

$\varphi_{вс}$ та $\varphi_{нс}$ – газовміст у трубах з висхідною і низхідною течією суміші;

$z_{вс}$ та $z_{нс}$ – число ходів із висхідним і низхідним потоками.

$$\Delta p_{ст} = 888,9 \cdot 9,81 \cdot 7,8 \cdot [1 \cdot (1 - 0,348) - 1 \cdot (1 - 0,788)] = 29912,3 \text{ Па}$$

Для трубного реактору $\varphi_{вс} = \varphi_{нс} = 1$

Газовміст низхідного потоку можна розрахувати за формулою:

$$\varphi_{нс} = \beta - \frac{\varphi_{вс}}{2}, \quad (2.63)$$

де β – витратний об'ємний газовміст суміші

$$\varphi_{нс} = 0,96 - \frac{0,348}{2} = 0,788$$

Витратний об'ємний газовміст суміші:

$$\beta = \frac{w_{г}}{w_{ж} + w_{г}}, \quad (2.64)$$

$$\beta = \frac{9,77}{0,39 + 9,77} = 0,962$$

Сумарні втрати тиску на гідравлічне тертя становитимуть:

$$\Delta p_{тр} = \frac{4 \cdot H}{d_{тр}} (z_{вс} \cdot \tau_{вс} + z_{нс} \cdot \tau_{нс}), \quad (2.65)$$

де $\tau_{вс}$ і $\tau_{нс}$ – дотичні напруги на стінках при висхідному та низхідному потоках.

$$\Delta p_{тр} = \frac{4 \cdot 7,8}{0,021} (1 \cdot 0,945 + 1 \cdot 6,737) = 11414,3 \text{ Па}$$

Дотичну напругу на стінці реактора обчислимо із співвідношення:

					<i>XI, TTP, 00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

$$\tau = \frac{\tau_{\text{ж}}}{(1-\varphi)^{1,75}}, \quad (2.66)$$

де φ – газовміст висхідного або низхідного потоку;

$\tau_{\text{ж}}$ – дотична напруга при турбулентному перебігу рідкої фази в барботажній трубі.

Відносна напруга для висхідного потоку:

$$\tau_{\text{вс}} = \frac{0,447}{(1-0,348)^{1,75}} = 0,945$$

Відносна напруга для низхідного потоку:

$$\tau_{\text{нс}} = \frac{0,447}{(1-0,788)^{1,75}} = 6,737$$

Відносна напруга в барботажній трубі:

$$\tau_{\text{ж}} = \frac{0,316}{\text{Re}_{\text{ж}}^{0,25}} \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot w_{\text{ж}}^2}{8}, \quad (2.67)$$

де $\text{Re}_{\text{ж}}$ – критерій Рейнольдса для рідкого потоку.

$$\tau_{\text{ж}} = \frac{0,316}{20018,5^{0,25}} \cdot \frac{888,9 \cdot 0,39^2}{8} = 0,447$$

Критерій Рейнольдса становитиме:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{0,389 \cdot 0,021 \cdot 888,95}{0,000363} = 20018,5$$

Тиск $p_{\text{уск}}$, необхідний для зв'язку суміші кінетичної енергії, визначається різницею швидкісних напорів на вході та виході з труби апарату.

$$\Delta p_{\text{ус}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot w_{\text{ж}}^2}{2 \cdot (1-\varphi_{\text{вс}})^2} - \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot w_{\text{ж}}^2}{2}, \quad (2.68)$$

$$\Delta p_{\text{ус}} = \frac{888,9 \cdot 0,389^2}{2 \cdot (1-0,348)^2} - \frac{888,9 \cdot 0,389^2}{2} = 91,06 \text{ Па},$$

Втрата тиску на місцевих опорах:

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

$$\sum \Delta p_m = 2,75 \cdot \xi_k \cdot (z_x - 1) \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot W_{ж}^2}{2 \cdot (1 - \beta)} + 2,75 \cdot \sum \xi \cdot \frac{\rho_{ж} \cdot W_{ж}^2}{2 \cdot (1 - \beta)}, \quad (2.69)$$

де ξ_k – коефіцієнт опору калача при перебігу в ньому однофазного потоку,
 $\xi_k = 0,16$;

$\sum \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів для потоку рідини.

z_x – число ходів у реакторі, $z_x = 2$.

$$\sum \Delta p_m = 2,75 \cdot 0,16 \cdot (2 - 1) \cdot \frac{888,9 \cdot 0,389^2}{2 \cdot (1 - 0,962)} + 2,75 \cdot 3 \cdot \frac{888,9 \cdot 0,389^2}{2 \cdot (1 - 0,962)} = 15278,8 \text{ Па}$$

Сума коефіцієнтів місцевих опорів складається з:

- коефіцієнт місцевого опору для виходу зі штуцера, $\xi = 1$;
- коефіцієнт місцевого опору для входу в труби, $\xi = 0,5$;
- коефіцієнт місцевого опору для виходу із труб, $\xi = 1$;
- коефіцієнт місцевого опору для входу в штуцер, $\xi = 0,5$.

$$\sum \xi = 1 + 0,5 + 1 + 0,5 = 3$$

Розрахунок гідравлічного опору міжтрубного простору реактора.

Розрахунок гідравлічного опору міжтрубного простору реактора за водою

Гідравлічний опір міжтрубного простору реактора розрахуємо за рівнянням:

$$\Delta P_{MT} = 2 \cdot (1 + k) \cdot Eu + \sum \xi_{M.T} \frac{\rho_{ж} \cdot W_{M.T}^2}{2} + \sum \xi_{шт} \frac{\rho_{ж} \cdot W_{шт}^2}{2} \quad (2.70)$$

де Eu – критерій Ейлера;

$W_{M.T}$ – швидкість потоку рідини у міжтрубному просторі, $w_{M.T} = w_B = 0,17$ м/с;

$W_{шт}$ – швидкість потоку рідини у штуцерах, $w_{шт} = 1,305$ м/с;

k – число поперечних перегородок, $k = 14$;

ζ – коефіцієнт місцевих опорів для міжтрубного простору.

$$\Delta P_{MT} = 2 \cdot (1 + 14) \cdot 2,093 + (19,5 + 1) \frac{998 \cdot 0,17^2}{2} + (1,5 + 1,5) \frac{998 \cdot 1,305^2}{2} = 2907,85 \text{ Па}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Проходячи через міжтрубний простір, потік долає наступні місцеві опори:

вихід із трубопроводу $\zeta = 1,5$;

вхід у трубопровід $\zeta = 1,5$;

поворот на $180^\circ \times 13$ $\zeta = 1,5 \times 13 = 19,5$

поворот на 90° $\zeta = 1,0$

Критерій Ейлера знайдемо із співвідношення:

$$Eu = b \cdot (2,7 + 1,7 \cdot m) \cdot Re^{-0,28} \quad (2.71)$$

де b - поправочний коефіцієнт для кожухотрубних теплообмінників $b = 0,83$;

m – число рядів труб у трубному пучку, $m = 16$.

$$Eu = 0,83 \cdot (2,7 + 1,7 \cdot 16) \cdot 6849^{-0,28} = 2,093$$

Розрахунок гідравлічного опору міжтрубного простору реактора за аміаком (формула 2.70):

$$\Delta P_{\text{MT}} = 2 \cdot (1 + 14) \cdot 0,783 + (19,5 + 1) \frac{810 \cdot 0,17^2}{2} + (1,5 + 1,5) \frac{810 \cdot 1,305^2}{2} = 2584 \text{ Па}$$

Проходячи через міжтрубний простір, потік долає наступні місцеві опори:

вихід із трубопроводу $\zeta = 1,5$;

вхід у трубопровід $\zeta = 1,5$;

поворот на $180^\circ \times 13$ $\zeta = 1,5 \times 13 = 19,5$

поворот на 90° $\zeta = 1,0$

Критерій Ейлера знайдемо із співвідношення (2.71):

$$Eu = 0,83 \cdot (2,7 + 1,7 \cdot 16) \cdot 229538^{-0,28} = 0,783$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{\text{ам}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{ам}}}{\mu_{\text{ам}}} = \frac{810 \cdot 0,17 \cdot 0,8}{0,468 \cdot 10^{-3}} = 229538$$

2.5 Вибір допоміжного обладнання

Розрахунок апарата повітряного охолодження

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

Проектований апарат повітряного охолодження малопотокового типу складається з теплообмінної секції 1 і секції подачі повітря 2, які установлені в корпусі 3. Теплообмінна секція складається з шести рядів оребрених труб 4, а секція подачі повітря складається з осьового вентилятора 5 з електродвигуном 6 та дифузора 7.

Спроектований АВМ-В є вертикальним апаратом з площею теплообміну 435 м², встановлений на двох опорах 9. На корпусі також розташовані колектори входу 10 і виходу 11 води, штуцера для установки приладів КВП.

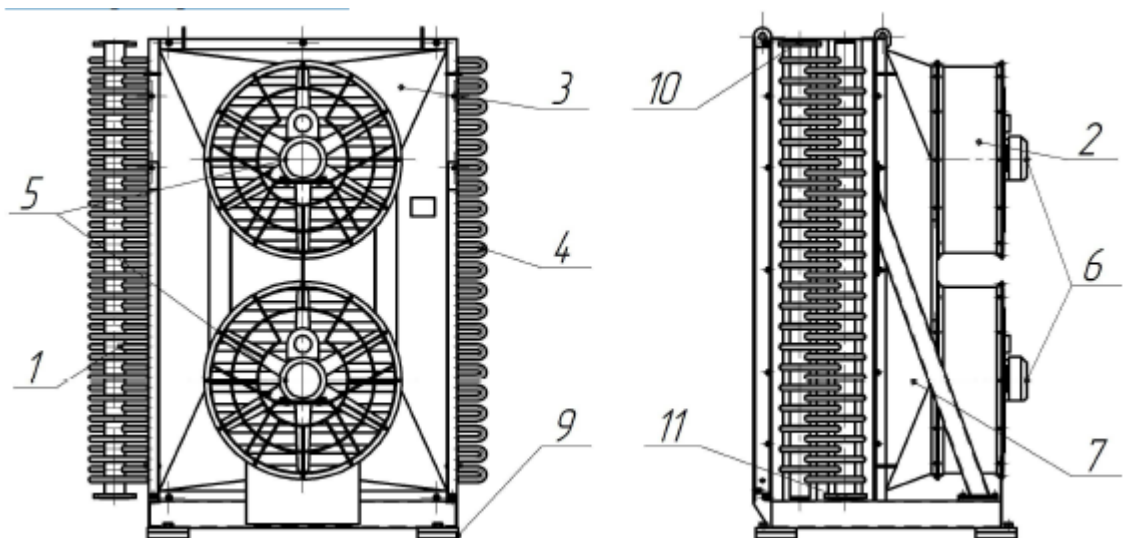


Рисунок. 2.4 – Конструкція проектного апарату повітряного охолодження малопотокового типу.

Теплове навантаження систему водяного охолодження $Q_1 = 669,44$ кДж/с.

Початкову температуру води, що подається в АВМ, приймаємо по максимально допустимій температурі внутрішнього середовища в абсорбційних колонах, $t_{\text{води}}^{\text{н}} = 45^\circ\text{C}$, а кінцеву - приймаємо рівною кінцевій температурі повітря, $t_{\text{води}}^{\text{к}} = 30^\circ\text{C}$. Кількість тепла, яке необхідно відвести від води:

$$Q_1 = G_{\text{води1}} \cdot C_{\text{води}} \cdot (t_{\text{води}}^{\text{н}} - t_{\text{води}}^{\text{к}}) \quad (2.72)$$

Звідки знаходимо витрати води:

$$G_{\text{води1}} = \frac{Q_1}{C_{\text{води}} \cdot (t_{\text{води}}^{\text{н}} - t_{\text{води}}^{\text{к}})} = \frac{669440}{4180 \cdot (45 - 30)} = 10,68 \text{ кг / с} \quad (2.73)$$

Середній температурний тиск для перехресного руху потоків знаходимо за формулою [1]:

$$\Delta t_{\text{cp}}^1 = \frac{\Delta t_{\text{тр}}}{2,31g \frac{1}{1 + \frac{\Delta t_{\text{тр}}}{\Delta t_{\text{мтр}}} \cdot 2,31g \left(1 - \frac{\Delta t_{\text{мтр}}}{\Delta t_{\text{н}}}\right)}} \quad (2.74)$$

$$\Delta t_{\text{cp}}^1 = \frac{45 - 30}{2,31g \frac{1}{1 + \frac{45 - 30}{30 - 25} \cdot 2,31g \left(1 - \frac{30 - 25}{45 - 25}\right)}} = 7,58^\circ\text{C}$$

Де $\Delta t_{\text{тр}}, \Delta t_{\text{мтр}}, \Delta t_{\text{н}}$ – різниці температур у трубному, міжтрубному просторі та початкових температур теплоносіїв відповідно, $^\circ\text{C}$.

З основного рівняння теплопередачі знаходимо необхідну поверхню теплообміну (2.31):

$$F_1 = \frac{Q_1}{k \cdot \Delta t_{\text{cp}}^1} = \frac{669440}{50 \cdot 7,58} = 1766,3 \text{ м}^2$$

де k - Коефіцієнт теплопередачі, орієнтовно приймаємо $k = 50 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Уточнені розрахунки процесу теплообміну

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі з боку гарячого теплоносія (води)

Середня температура в апараті:

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{\text{води}}^{\text{н}} + t_{\text{води}}^{\text{к}}}{2} = \frac{45 + 30}{2} = 37,5^\circ\text{C} \quad (2.75)$$

За цих умов: $\rho_{\text{води}} = 990 \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{води}} = 4180 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\lambda_{\text{води}} = 63,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Масова витрата води в одному апараті:

$$G_{\text{води}}^{\text{ап}} = \frac{G}{n_{\text{ап}}} = \frac{10,68}{18} = 0,593 \text{ кг/с} \quad (2.76)$$

Об'ємна витрата води в одному апараті:

$$V_{\text{води}}^{\text{ап}} = \frac{G_{\text{води}}^{\text{ап}}}{\rho_{\text{води}}} = \frac{0,593}{990} = 0,0006 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.77)$$

Швидкість води в апараті:

$$w_{\text{води}} = \frac{n_x \cdot V_{\text{води}}^{\text{ап}}}{S_1 \cdot n_c} = \frac{2 \cdot 0,0006}{0,0386 \cdot 1} = 0,031 \text{ м / с} \quad (2.78)$$

де n_x – кількість ходів, прим; S_1 – площа перерізу однієї секції, м^2 ; n_c – кількість секцій, шт.

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{\text{води}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{води}}}{\mu_{\text{води}}} = \frac{0,107 \cdot 0,021 \cdot 990}{0,5988 \cdot 10^{-3}} = 3715$$

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_{\text{води}} \cdot c_{\text{води}}}{\lambda_{\text{води}}} = \frac{0,5988 \cdot 10^{-3} \cdot 4180}{63,4 \cdot 10^{-3}} = 39,48$$

Критеріальне рівняння для перехідного режиму перебігу рідини:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,75} \cdot Pr^{0,4} = 0,037 \cdot 3715^{0,75} \cdot 39,48 = 76,6$$

Звідки знаходимо коефіцієнт тепловіддачі для води:

$$\alpha_{\text{води}} = Nu \frac{\lambda_{\text{води}}}{d_{\text{вн}}} = 76,6 \frac{63,4 \cdot 10^{-3}}{0,021} = 231,26 \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{К} \quad (2.79)$$

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі з боку холодного теплоносія (повітря):

Середня температура повітря в апараті (2.75):

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{пов}}^{\text{н}} + t_{\text{пов}}^{\text{к}}}{2} = \frac{30 + 25}{2} = 27,5^{\circ}\text{C}$$

За цих умов: $\rho_{\text{води}} = 1,184 \text{ кг / м}^3$, $c_{\text{пов}} = 1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\lambda_{\text{води}} = 0,022 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}$.

Масова витрата повітря в одному апараті (2.76):

$$G_{\text{пов}}^{\text{ап}} = \frac{G}{n_{\text{ап}}} = \frac{785}{18} = 43,6 \text{ кг / с}$$

Об'ємна витрата повітря в одному апараті (2.77):

$$V_{\text{пов}}^{\text{ап}} = \frac{G_{\text{пов}}^{\text{ап}}}{\rho_{\text{пов}}} = \frac{43,6}{1,184} = 36,82 \text{ м}^3 / \text{с}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Площа вхідного перерізу міжтрубного простору $F_{м.тр} = 2,1$ [2].

Швидкість повітря на вході в апарат за формулою (2.77):

$$w_{пов} = \frac{V_{пов}^{ап}}{F_{м.тр}} = \frac{36,82}{2,1} = 17,5 \text{ м / с}$$

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_{пов} \cdot c_{пов}}{\lambda_{пов}} = \frac{1,86 \cdot 10^{-3} \cdot 1005}{0,022} = 0,85$$

Звідки знаходимо коефіцієнт тепловіддачі для повітря:

$$\alpha_{пов} = c_2 \cdot \lambda_{пов} \left(\frac{w_{пов} \cdot \rho_{пов}}{\mu_{пов}} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,35} = 0,45 \cdot 0,022 \left(\frac{17,5 \cdot 1,184}{1,86 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,85^{0,35} =$$
$$= 39,72 \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{К}$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі за формулою (2.78):

$$\alpha_{пов}^{пр} = c_1 \cdot \alpha_{пов} = 0,6 \cdot 39,72 = 23,8 \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{К}$$

Розрахунок коефіцієнта теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{води}} + \frac{1}{\alpha_{пов}^{пр} \cdot K_{ор}} + \frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}} + \sum r} \quad (2.79)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{231,26} + \frac{1}{23,8 \cdot 22} + \frac{0,002}{46,5} + 0,0002 + 0,0002} = 150,5 \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{К}$$

Де $K_{ор}$ – коефіцієнт оребрення; $r_{води} = 0,0002 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ – термічний опір забруднень із боку води [3]; $r_{пов} = 0,0002 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ - термічний опір забруднень з боку повітря [3].

Уточнимо необхідну площу теплообміну для найбільш навантаженого режиму по формулі (2.78):

$$F_1 = \frac{669440}{150,5 \cdot 7,58} = 586,8 \text{ м}^2$$

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

Таким чином, остаточно приймаємо, що для реалізації процесу охолодження води системи водяного охолодження установки отримання РАД та враховуючи вимоги ТЗ щодо блочно-модульного виконання установки, необхідно використовувати 2 апарати повітряного охолодження малопотокового типу, з поверхнею теплообміну 435 м^2 , коефіцієнтом ребра труб 22, на умовний тиск 0,6МПа, з електродвигуном у вибухонебезпечному виконанні, восьмирядний, з довжиною труб 1,5м.

Розрахунок запасу поверхні теплообміну:

$$K_3 = \frac{2 \cdot 435}{568,8} - 1 = 0,483 \text{ або } 48,3\%$$

Розрахунок дегазатора

Дегазатор повинен забезпечити видалення газових бульбашок із готового продукту. Прийmemo мінімальний діаметр міхура газу, що видаляється, $d_{\text{п}} = 0,1$ мм. [4].

Швидкість спливання бульбашки газу розрахуємо за формулою:

$$u_p = \frac{1}{12} \cdot \frac{d_{\text{п}}^2 \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) \cdot g}{\mu_{\text{ж}}} = \frac{1}{12} \cdot \frac{0,0001^2 \cdot (888,9 - 2,56) \cdot 9,81}{0,000363} = 0,02 \text{ м / с}$$

Час спливання бульбашки знайдемо з рівняння:

$$\tau = \frac{h}{u_p} \quad (2.80)$$

де h – висота шару рідини на полиці дегазатора.

Прийmemo висоту шару рідини на полиці $h = 0,05$ м.

$$\tau = \frac{0,05}{0,02} = 2,5 \text{ с}$$

Необхідна активна площа дегазатора:

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

$$S_d = \frac{V}{h} \cdot \tau = \frac{0,0162}{0,05} \cdot 2,5 = 0,81 \text{ м}^2 \quad (2.81)$$

Прийmemo діаметр дегазатора $D = 0,6 \text{ м}$.

Площа однієї полиці:

$$S = \frac{3}{16} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{3}{16} \cdot 3,14 \cdot 0,6^2 = 0,212 \text{ м}^2 \quad (2.82)$$

Необхідна кількість полиць у дегазаторі:

$$n = \frac{S_d}{S} = \frac{0,81}{0,212} = 3,8 \text{ шт.} \quad (2.83)$$

Розрахунок та підбір циркуляційного насоса

Потрібну потужність циркуляційного насоса для перекачки рідини від сепаратора в штуцер А визначимо за такою формулою:

$$N = N_1 + N_2 \quad (2.84)$$

де N_1 – потужність, що витрачається на перекачування суміші газу та рідини через реактор;

N_2 – потужність, що витрачається на перекачування рідини в циркуляційному трубопроводі.

$$N = 23934,6 + 1704,4 = 25639,1 \text{ Вт} = 25,64 \text{ кВт}$$

Потужність, що витрачається на перекачування газу та рідини у трубчастому реакторі

$$N_1 = V_{cm} \cdot \Delta p_T, \quad (2.85)$$

де V_{cm} – об'ємна витрата газорідинної суміші;

Δp_T – гідравлічний опір трубчастого реактора.

$$N_1 = 0,422 \cdot 56696,5 = 23934,6 \text{ Вт}$$

Об'ємна витрата газорідинної суміші:

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

$$V_{\text{см}} = V_{\text{г}} + V_{\text{ж}} \quad (2.86)$$

де $V_{\text{г}}$ и $V_{\text{ж}}$ – об'ємна витрата рідини та газу, що прокачується через реактор.

$$V_{\text{см}} = 0,406 + 0,016 = 0,422 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Потужність насоса, що витрачається на перекачування рідини по циркуляційній трубі:

$$N_2 = V_{\text{ж}} \cdot \Delta p_{\text{ц}}, \quad (2.87)$$

де $V_{\text{ж}}$ – об'ємна витрата рідини, що перекачується через циркуляційний контур; $\Delta p_{\text{ц}}$ – гідравлічний опір циркуляційного контуру.

$$N_2 = 0,016 \cdot 105401,7 = 1704,4 \text{ Вт}$$

Гідравлічний опір циркуляційного контуру знайдемо за співвідношенням:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \left(\frac{\lambda \cdot L}{d_{\text{ц.т}}} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot w_{\text{ж}}^2}{2} + \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h, \quad (2.88)$$

де λ – коефіцієнт тертя;

$d_{\text{ц.т.}}$ – діаметр циркуляційної труби, $d_{\text{ц.т.}} = 0,1 \text{ м}$;

$\sum \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів;

$w_{\text{ж}}$ – швидкість течії рідини у циркуляційній трубі, $w_{\text{ж}} = 2,06 \text{ м/с}$;

L – довжина циркуляційної труби, $L = 15 \text{ м}$;

h – геометрична висота підйому рідини в циркуляційному контурі, $h = 10 \text{ м}$.

$$\Delta p_{\text{ц}} = \left(\frac{0,022 \cdot 15}{0,1} + 6,4 \right) \cdot \frac{888,9 \cdot 2,06^2}{2} + 888,9 \cdot 9,81 \cdot 10 = 105401,7 \text{ Па}$$

Коефіцієнт тертя залежить від критерію Рейнольдса, який визначають із співвідношення:

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		51

$$Re = \frac{w_{ж} \cdot d_{ц.т} \cdot \rho_{ж}}{\mu_{ж}} = \frac{2,06 \cdot 0,1 \cdot 888,9}{0,000363} = 504465,6$$

$$\text{Для } Re > \frac{560}{e} = \frac{560}{0,0015} = 373333$$

$$\text{Коефіцієнт } \lambda = 0,11 \cdot e^{0,25} = 0,11 \cdot 0,0015^{0,25} = 0,022$$

$$\text{де } e = \Delta / d_{ц.т.} = 0,15 \cdot 10^{-3} / 0,1 = 0,0015$$

Значення абсолютної шорсткості для сталевих труб, що знаходяться в експлуатації $\Delta = 0,1 \div 0,2$ мм.

Коефіцієнти місцевих опорів для циркуляційного контуру:

- вихід із труби в дегазатор $\zeta = 1$;
- вхід у трубу з дегазатора $\zeta = 0,5$;
- поворот на 90° $\zeta = 1,1 \times 4$ шт.
- вентиль прямоточний $\zeta = 0,5$.

Сума коефіцієнтів місцевих опорів $\Sigma \zeta = 6,4$.

Сумарний мінімально необхідний напір циркуляційного насоса:

$$H = \frac{\Delta p_{ц} + \Delta p_{т}}{\rho_{ж} \cdot g} = \frac{105401,7 + 56696,5}{888,9 \cdot 9,81} = 18,6 \text{ м} \quad (2.89)$$

Необхідна потужність приводу циркуляційного насоса:

$$N_{п} = \frac{N}{(\eta_{н} \cdot \eta_{пер})}, \quad (2.90)$$

де $\eta_{н}$ и $\eta_{пер}$ – відповідно коефіцієнти корисної дії насоса та приводу. Для відцентрових насосів $\eta_{н} = 0,78$; $\eta_{пер} = 0,89$.

$$N_{п} = \frac{25,64}{(0,78 \cdot 0,89)} = 36,93 \text{ кВт}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

За розрахованими параметрами вибираємо відцентровий насос типу X280/29 з наступними характеристиками:

- виконання корозійностійке;
- номінальна подача насоса 0,08 м³ /с;
- номінальний натиск 25м;
- ККД насоса 0,78;
- ККД привода 0,89;
- потужність приводу 55 кВт;
- тип електродвигуна АО2-82-4.

					<i>XI. ТГР.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>53</i>

3. Розрахунки апарата на міцність та герметичність

3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки

Днище еліптичне нижнє. Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445, [10]

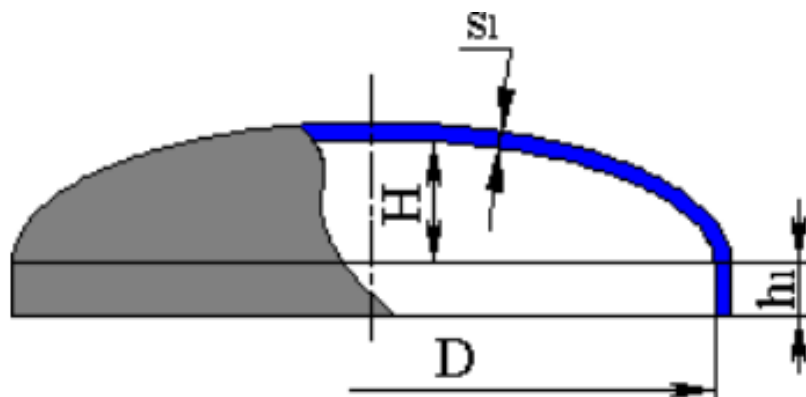


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема еліптичного днища

Вихідні дані:

Матеріал: 12X18H10T

Внутрішній діаметр D: 600 мм

Товщина стінки днища, s_1 : 6 мм

Добавка для компенсації корозії та ерозії, $c_1 = t \cdot \Pi = 20 \cdot 0,1 = 2$ мм

де t – строк служби апарату, років;

Π – роникність матеріалу, $\Pi = 0,1$.

Добавка для компенсації мінусового допуску, c_2 : 0 мм

Добавка технологічна, c_3 : 0 мм

Сумарне збільшення до товщини стінки, c : 2 мм

Висота днища, H: 150 мм

Довжина відбортування, h_1 : 25 мм

Радіус кривизни у вершині днища:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H}, \quad (3.1)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TGP.00.00.00 ПЗ

Лист

54

$$R = \frac{600^2}{4 \cdot 150} = 600 \text{ мм}$$

Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi = 0,9$

Розрахунок у робочих умовах:

Умови навантаження:

Розрахункова температура, $T: 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск згідно [19] , $p 1,693649 \text{ МПа}$

Результати розрахунку

Допустима напруга:

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
(робочі умови):

$$[\sigma] = 177,5 \text{ МПа}$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12Х18Н10Т за температури 70°C :

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, навантажені внутрішнім надлишковим тиском (п. 3.3.1) [10].

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків:

$$s_{1p} + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c, \quad (3.2)$$

$$s_{1p} + c = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p} + c = \frac{1,693649 \cdot 600}{2 \cdot 177,5 \cdot 0,9 - 0,5 \cdot 1,693649} + 2 = 5,189014 \text{ мм}$$

Допустимий тиск:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)}, \quad (3.3)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 177,5 \cdot 0,9 \cdot (6 - 2)}{(600 + 0,5 \cdot (6 - 2))} = 2,122924 \text{ МПа}$$

$$2,122924 \text{ МПа} \geq 1,693649 \text{ МПа}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

Висновок: умова міцності виконана.

Розрахунок в умовах випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T: 20°C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p: 2,166649 МПа

За EN 13445 розрахунок на міцність при випробуваннях не проводиться, якщо виконана умова:

$$P_{\text{надл}} < 1,35 \cdot P_{\text{роз}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \quad (3.4)$$

$$1,35 \cdot P_{\text{роз}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 1,693649 \cdot 184 / 177,5 = 2,370154 \text{ МПа} \geq 2,166649 \text{ МПа}.$$

Допустимі напруження:

Допустимі напруження для матеріалу 12X18H10T при температурі t = 20°C (умова гідровипробувань):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T, \quad (3.5)$$

$$[\sigma]^{20} = 1 \cdot 276 / 1,1 = 250,9091 \text{ МПа}$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12X18H10T при температурі 20°C:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, навантажені внутрішнім надлишковим тиском (п. 3.3.1) [10].

Для визначення радіусу кривизни у вершині днища використаємо формулу (3.1):

$$R = \frac{600^2}{4 \cdot 150} = 600 \text{ мм}$$

Розрахункову товщину стінки з врахуванням прибавок розрахуємо за формулою (3.2):

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

$$s_{1p} + c = \frac{2,166649 \cdot 600}{2 \cdot 250,9091 \cdot 0,9 - 0,5 \cdot 2,166649} + 2 = 4,885319 \text{ мм}$$

Допустимий тиск визначимо за формулою (3.3):

$$[p] = \frac{2 \cdot 250,9091 \cdot 0,9 \cdot (6 - 2)}{(600 + 0,5 \cdot (6 - 2))} = 3,000906 \text{ МПа}$$

$$3,000906 \text{ МПа} \geq 2,166649 \text{ МПа}$$

Висновок: умова міцності виконана.

Днище еліптичне верхнє. Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445, [10]. Розрахунок проведений згідно з методикою, що наведена вище, для нижнього еліптичного днища.

Розрахункова представлена на рисунку 3.1

Вихідні дані:

Матеріал: 16ГС

Внутрішній діаметр D: 600 мм

Товщина стінки днища, s_1 : 6 мм

Добавка для компенсації корозії та ерозії, c_1 : 2 мм.

Добавка для компенсації мінусового допуску, c_2 : 0 мм

Добавка технологічна, c_3 : 0 мм

Сумарне збільшення до товщини стінки, c : 2 мм

Висота днища, H: 150 мм

Довжина відбортування, h_1 : 25 мм

Радіус кривизни у вершині за формулою (3.1): R = 600 мм

Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi = 0,9$

Розрахунок у робочих умовах:

Умови навантаження:

Розрахункова температура, T: 70 °C

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p : 0,6032438 МПа

Результати розрахунку

Допустима напруга:

Допустима напруга для матеріалу 16ГС при температурі $t = 70$ °С (робочі умови): $[\sigma] = 184$ МПа

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 16ГС за температури 70°С:

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, навантажені внутрішнім надлишковим тиском (п. 3.3.1) [10].

Розрахункова товщина стінки з врахуванням прибавок за формулою (3.2):

$$s_{ip} + c = 3,093829 \text{ мм}$$

Допустимий тиск за формулою (3.3): $[p] = 2,200664$ МПа

$$2,200664 \text{ МПа} \geq 0,6032438 \text{ МПа}$$

Висновок: умова міцності виконана.

Розрахунок в умовах випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T : 20°С

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p : 0,9032438 МПа

Допустимі напруження:

Допустимі напруження для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 20$ °С (умова гідровипробувань) за формулою (3.5): $[\sigma]^{20} = 272,7273$ МПа

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 16ГС при температурі 20°С:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Днища, навантажені внутрішнім надлишковим тиском (п. 3.3.1) [10].

Радіус кривизни у вершині за формулою (3.1): $R = 600$ мм

Розрахункова товщина стінки з врахуванням прибавок за формулою (3.2):

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

$$s_{ip} + c = 3,104981 \text{ мм}$$

Допустимий тиск за формулою (3.3): $[p] = 3,261854 \text{ МПа}$

$$3,261854 \text{ МПа} \geq 0,9032438 \text{ МПа}$$

Висновок: умова міцності виконана.

Верхня теплообмінна секція. Трубна решітка

Вихідні дані:

Решітка:

Матеріал: 12Х18Н10Т

Товщина ґрат, s_{-p} : 50 мм

Сума додатків до розрахункової товщини ґрат, c_p : 2 мм

Товщина решітки в зоні кільцевої прокладки s_{pn} : 40 мм

Діаметр потовщеної частини, D_B : 595 мм

Наявність перегородки: Так

Товщина ґрат в місці паза під перегородку, s_n : 45 мм

Ширина паза під перегородку, b_n : 12 мм.

Крок розташування отворів, t_p : 32 мм

Відстань між рядами отворів, t_n 55,42563 мм

Товщина стінки, s_T 2 мм

Сумарне збільшення, c_T : 2 мм

Діаметр отворів, d_0 : 25,5 мм

Спеціальні вимоги до жорсткості (неприпустимий залишковий прогин): Ні

Діаметр кола, вписаного в максимальну без трубну площу, D_E : 67,89262 мм

Відстань від осі кожуха до осі найвіддаленішої труби, a_1 278,9695 мм

Розрахунок у робочих умовах:

Умови навантаження:

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

Розрахунковий надлишковий тиск у трубному просторі, p_T : 1,6 МПа

Розрахунковий надлишковий тиск у міжтрубному просторі, p_M : 0,6 МПа

Розрахункова температура решітки, T_p : 70 °С

Результати розрахунку:

Властивості матеріалу першої трубної решітки:

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 70$ °С
(умови праці):

$$[\sigma]_p = 177,5 \text{ МПа}$$

Міцність трубної решітки:

Розрахунковий тиск (приймається рівним максимально можливому перепаду тисків, що діють на решітку):

$$p_R = \max \{ |p_T|; |p_M|; |p_T - p_M| \} = \max \{ |1,6|; |0,6|; |1,6 - 0,6| \} = 1,6 \text{ МПа} \quad (3.6)$$

Визначимо розрахункову товщину трубної решітки в безтрубній зоні:

$$s_{pp} = 0,5 \cdot D_E \sqrt{\frac{p_R}{[\sigma]_p}}, \quad (3.7)$$

$$s_{pp} = 0,5 \cdot 67,89262 \cdot \left(\frac{1,6}{177,5} \right)^{1/2} = 3,222949 \text{ мм}$$

Умова міцності: $s_p \geq s_{pp} + c_p$

$50 \geq 3,222949 + 2 = 5,222949$ мм. Умова міцності виконана.

Для решіток з трубами, закріпленими на всю товщину решітки:

$$d_E = d_0 - s_T, \quad (3.8)$$

$$d_E = 25,5 - 2 = 23,5 \text{ мм}$$

Ефективний коефіцієнт послаблення:

$$\phi_E = 1 - \frac{d_E}{t_p}, \quad (3.9)$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

$$\phi_E = 1 - \frac{23,5}{32} = 0,265625$$

Розрахункова товщина трубної решітки у зоні перфорації:

$$s_p^p = \frac{D_{\text{сп}}}{4,2} \sqrt{\frac{p_R}{\phi_E [\sigma]_p}}, \quad (3.10)$$

$$s_p^p = \frac{650}{4,2} \cdot \sqrt{\frac{1,6}{0,265625 \cdot 177,5}} = 28,50955 \text{ мм}$$

Умова міцності: $s_p \geq s_p^p + c_p$

50 мм \geq 28,50955 + 2 = 30,50955 мм. Умова міцності виконана.

Розрахункова товщина трубної решітки з умови міцності в перерізі канавки:

$$s_{np} = s_p^p \max \left\{ \left[1 - \sqrt{\frac{d_0}{b_n} \left(\frac{t_n}{t_p} - 1 \right)} \right]; \sqrt{\phi_E} \right\}, \quad (3.11)$$

$$s_{np} = 28,50955 \cdot \max \left\{ \left[1 - \sqrt{\frac{25,5}{12} \left(\frac{55,42563}{32} - 1 \right)} \right]; \sqrt{0,265625} \right\} = 14,69349 \text{ мм}$$

Умова міцності: $s_p \geq s_{np} + c_p$

45 мм \geq 14,69349 + 2 = 16,69349 мм. Умова міцності виконана.

Розрахункова товщина решітки в місці ущільнення під кільцеву прокладку:

$$s_{pn}^p = \max \left\{ 0,71 \sqrt{\frac{p_R}{[\sigma]_p} D_{\text{сп}} \cdot (D_{\text{сп}} - D_B)}; 0,5 \cdot D_{\text{сп}} \cdot \frac{p_R}{[\sigma]_p} \right\}, \quad (3.12)$$

$$s_{pn}^p = \max \left\{ 0,71 \sqrt{\frac{1,6}{177,5} \cdot 650 \cdot (650 - 595)}; 0,5 \cdot 650 \cdot \frac{1,6}{177,5} \right\} = 12,74551 \text{ мм}$$

Умова міцності: $s_{pn} \geq s_{pn}^p + c_p$

40 мм \geq 12,74551 + 2 = 14,74551 мм. Умова міцності виконана.

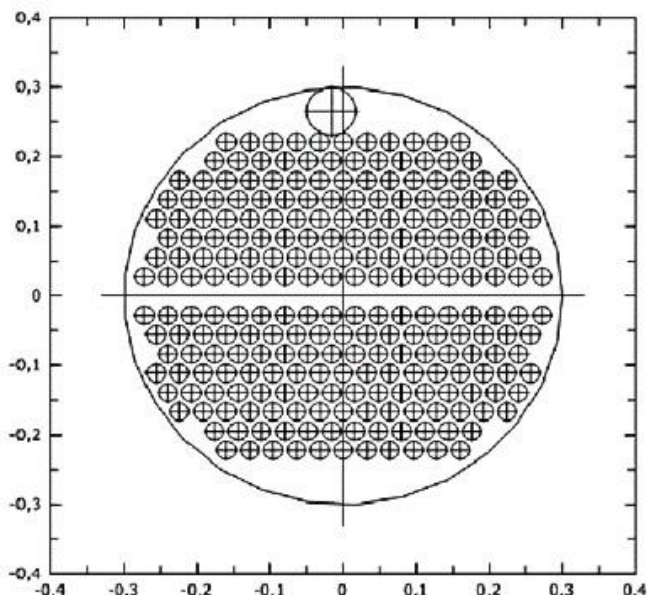


Рисунок 3.2 – Ескіз трубної решітки

Розрахунок за умов випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахунковий надлишковий тиск у трубному просторі, p_T : 2,073 МПа

Розрахунковий надлишковий тиск у міжтрубному просторі, p_M : 0,9 МПа

Розрахункова температура решітки, T_p : 20 °С

Результати розрахунку:

Властивості матеріалу першої трубної решітки:

Допустимі напруження для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 20^\circ\text{C}$
(умова гідровипробувань) за формулою (3.5): $[\sigma]^{20} = 250,9091$ МПа

Міцність трубної решітки:

Розрахунковий тиск (приймається рівним максимально можливому перепаду тисків, що діють на решітку):

$$p_R = \max \{ |p_T|; |p_M|; |p_T - p_M| \} \quad (3.13)$$

$$p_R = \max \{ |2,073|; |0,9|; |2,073 - 0,9| \} = 2,073 \text{ МПа}$$

Розрахункову товщину трубної решітки у безтрубній зоні визначимо за формулою (3.7): $s_{pp} = 3,08556$ мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Умова міцності: $s_p \geq s_{pp} + c_p$, $50 \geq 3,08556 + 2 = 5,08556$ мм. Умова міцності виконана.

Для решіток з трубами, закріпленими на всю товщину решітки використаємо формулу (3.8): $d_E = 23,5$ мм

Для визначення ефективного коефіцієнту послаблення застосуємо формулу (3.9): $\phi_E = 0,265625$

Розрахункову товщину трубної решітки у зоні перфорації визначимо за формулою (3.10): $s_p^p = 27,29424$ мм. Умова міцності: $s_p \geq s_p^p + c_p$

50 мм $\geq 27,29424 + 2 = 29,29424$ мм. Умова міцності виконана.

Розрахункову товщину трубної решітки з умови міцності в перерізі канавки визначимо за формулою (3.11): $s_{np} = 14,06713$ мм Умова міцності: $s_p \geq s_{np} + c_p$

45 мм $\geq 14,06713 + 2 = 16,06713$ мм. Умова міцності виконана.

Розрахункову товщину решітки в місці ущільнення під кільцеву прокладку визначимо за формулою (3.12):

$$s_{pn}^p = \max \left\{ 0,71 \sqrt{\frac{2,073}{250,9091} \cdot 650 \cdot (650 - 595)}; 0,5 \cdot 650 \cdot \frac{2,073}{250,9091} \right\} = 12,20219 \text{ мм}$$

Умова міцності: $s_{pn} \geq s_{pn}^p + c_p$, 40 мм $\geq 12,20219 + 2 = 14,20219$ мм. Умова міцності виконана.

Розподільна камера

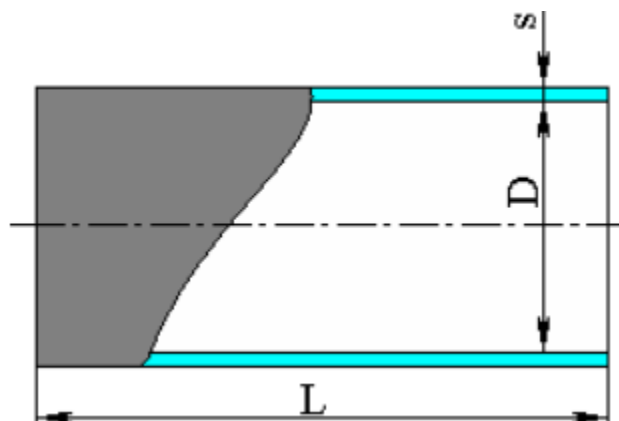


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема обичайки

Вихідні дані:

Матеріал: 12X18H10T

Внутрішній діаметр D: 600 мм

Товщина стінки, s: 6 мм

Добавка для компенсації корозії та ерозії, c_1 : 2 мм.

Добавка для компенсації мінусового допуску, c_2 : 0 мм

Добавка технологічна, c_3 : 0 мм

Сума додатків до розрахункової товщини стінки, c : 2 мм

Довжина обичайки, L: 600 мм

Коефіцієнти міцності зварних швів:

Поздовжній шов: $\phi_p = 0,9$

Окружний шов: $\phi_T = 0,9$

Розрахунок у робочих умовах:

Умови навантаження

Розрахункова температура, T: 70 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск згідно [19], p: 1,690131 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M: 0 Н·м

Розрахункове поперечне зусилля Q: 0 Н

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, F: 0 Н

Результати розрахунку:

Допустима напруга для матеріалу 12X18H10T при температурі $t = 70^{\circ}\text{C}$

(умови праці):

$[\sigma] = 177,5$ МПа

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12X18H10T за температури 70°C:

$E = 2 \cdot 10^5$ МПа

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

[10]).

Допустимий тиск:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_p \cdot (s - c)}{D \cdot (s - c)}, \quad (3.14)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 177,5 \cdot 0,9 \cdot (6 - 2)}{600 + 6 - 2} = 2,115894 \text{ МПа}$$

$$2,115894 \geq 1,690131 \text{ (МПа)}$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_p - p} + c, \quad (3.15)$$

$$s_p + c = \frac{1,690131 \cdot 600}{2 \cdot 177,5 \cdot 0,9 - 1,690131} + 2 = 5,190833 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}, \quad (3.16)$$

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{6 - 2}{3,190833} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{600 \cdot (6 - 2)} = 44,44266 \text{ мм}$$

Мінімальна відстань між "одиночними" штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)}, \quad (3.17)$$

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{600 \cdot (6 - 2)} = 97,97959 \text{ мм}$$

Розрахунок за умов випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T: 20 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск (з урахуванням гідростатичного), p: 2,163131 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M: 0 Н·м

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

Розрахункове поперечне зусилля Q: 0 Н

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, F: 0 Н

За EN 13445 розрахунок на міцність при випробуваннях не проводиться, якщо виконано умову:

$$P_{\text{надл}} < 1,35 \cdot P_{\text{роз}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \quad (3.18)$$

$$1,35 \cdot 1,690131 \cdot 184 / 177,5 = 2,365231 \text{ МПа} \geq 2,163131 \text{ МПа}$$

Допустимі напруження для матеріалу 12X18H10T при температурі $t = 20^\circ\text{C}$ (умова гідровипробувань) за формулою (3.5): $[\sigma]^{20} = 250,9091 \text{ МПа}$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12X18H10T при температурі 20°C : $E^{20} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]. Розрахунок проведемо згідно з методикою наведеною вище.

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1. [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 2,990969 \text{ МПа}$

$$2,990969 \geq 2,163131 (\text{МПа})$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$$s_p + c = 4,887554 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 57,34308 \text{ мм}$

Мінімальна відстань між “одиночними” штуцерами за формулою (3.17):

$$b_0 = 97,97959 \text{ мм}$$

Нижня теплообмінна секція. Кожух теплообмінника

Розрахунок проведемо згідно з методикою наведеною вище.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

Розрахункова схема представлена на рисунку 3.4:

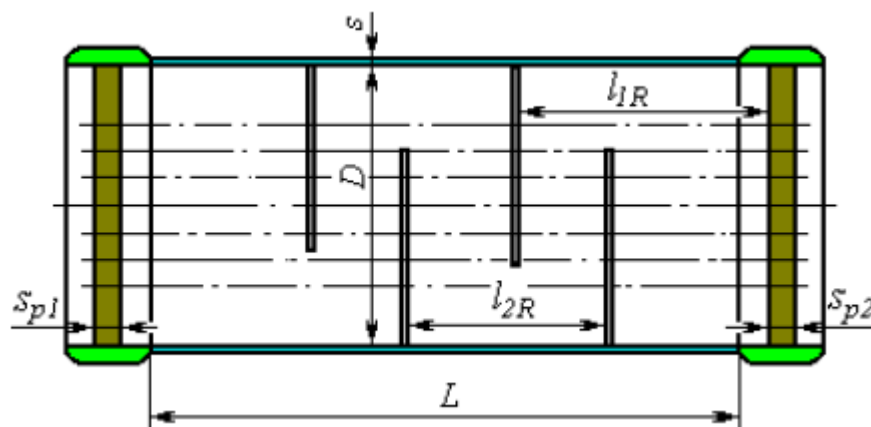


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема теплообмінної секції

Розрахунок у робочих умовах:

Умови навантаження:

Розрахункова температура, T : 70 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p : 1,6 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M : 0 Н·м

Розрахункове поперечне зусилля Q : 0 Н

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, F : $1,013281 \cdot 10^6$ Н

Результати розрахунку:

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 70$ °C (умови праці): $[\sigma] = 177,5$ МПа

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12Х18Н10Т за температури 20 °C: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1. [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 3,163366$ МПа

$$3,163366 \geq 1,6 \text{ (МПа)}$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$$s_p + c = 5,019818 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 142,425 \text{ мм}$

Мінімальна відстань між “одиночними” штуцерами за формулою (3.17):

$$b_0 = 120 \text{ мм}$$

Обичайка, навантажена осьовим зусиллям, що розтягує (п. 2.3.3 [10]).

Допустиме осьове стискаюче зусилля з умови міцності:

$$[F]_{\text{п}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma], \quad (3.19)$$

$$[F]_{\text{п}} = 3,141593 \cdot (600 + 8 - 2) \cdot (8 - 2) \cdot 177,5 = 2,027557 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допустиме осьове зусилля, що розтягує:

$$[F] = [F]_{\text{п}} \cdot \phi_t, \quad (3.20)$$

$$[F] = 2,027552 \cdot 10^6 \cdot 0,9 = 1,824797 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$1,824797 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1,013281 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Висновок: Умову міцності та стійкості виконано.

Обичайка, що працює під спільною дією внутрішнього тиску, осьового розтягуючого зусилля і згинального моменту.

Перевірка умови міцності:

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0; \quad (3.21)$$

$$\frac{1,013281 \cdot 10^6 + 1,6 \cdot \frac{3,141593 \cdot 600^2}{4}}{1,824797 \cdot 10^6} + \frac{0}{0} = 0,803196 \leq 1$$

Висновок: Умову міцності виконано.

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

Розрахунок за умов випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T : 20 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск (з урахуванням гідростатичного), p : 2,073 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M : 0 Н м

Розрахункове поперечне зусилля Q : 0 Н

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, F : $5,049594 \cdot 10^5$ Н

За EN 13445 розрахунок на міцність при випробуваннях не проводиться, якщо виконано умову (3.18):

$$1,35 \cdot 1,6 \cdot 184 / 177,5 = 2,239099 \text{ МПа} \geq 2,073 \text{ МПа}$$

Допустимі напруження для матеріалу 12X18Н10Т при температурі $t = 20^\circ\text{C}$ (умова гідровипробувань) за формулою (3.5): $[\sigma]^{20} = 250,9091$ МПа

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12X18Н10Т при температурі 20°C : $E^{20} = 2 \cdot 10^5$ МПа .

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1. [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 4,471647$ МПа

$$4,471647 \text{ МПа} \geq 2,073 \text{ МПа}$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$$s_p + c = 4,766685 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 164,2393$ мм

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

Мінімальна відстань між “одиначними” штуцерами за формулою (3.17):

$$b_0 = 120 \text{ мм}$$

Обичайка, навантажена осьовим зусиллям, що розтягує (п. 2.3.3 [10]).

Допустиме осьове стискаюче зусилля з умови міцності за формулою (3.19):

$$[F]_{\text{п}} = 2,866092 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допустиме осьове зусилля, що розтягує розрахуємо за формулою (3.20):

$$[F] = 2,579483 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,579483 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 5,049594 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Висновок: Умову міцності та стійкості виконано.

Обичайка, що працює під спільною дією внутрішнього тиску, осьового розтягуючого зусилля і згинального моменту.

Перевірку умови міцності проведемо за відношенням (3.21): $0,4229865 \leq 1$

Висновок: Умову міцності виконано.

Середня теплообмінна секція. Кожух теплообмінника

Розрахунок проведемо згідно з методикою наведеною вище для нижньої теплообмінної секції:

Розрахункова схема наведена на рисунку 3.4

Розрахунок у робочих умовах

Умови навантаження:

Розрахункова температура, T : $70 \text{ }^\circ\text{C}$

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p : $1,6 \text{ МПа}$

Розрахунковий згинальний момент, M : $0 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Розрахункове поперечне зусилля Q : 0 Н

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, F : $8,13229 \cdot 10^5 \text{ Н}$

Результати розрахунку:

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

Допустима напруга для матеріалу 12X18H10T при температурі $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
(умови праці): $[\sigma] = 177,5 \text{ МПа}$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12X18H10T за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$: $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1. [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 3,163366 \text{ МПа}$

$$3,163366 \text{ МПа} \geq 1,6 \text{ МПа}$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$$s_p + c = 5,019818 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 142,425 \text{ мм}$

Мінімальна відстань між “одиночними” штуцерами за формулою (3.17):

$$b_0 = 120 \text{ мм}$$

Обичайка, навантажена осьовим зусиллям, що розтягує (п. 2.3.3 [10]).

Допустиме осьове стискаюче зусилля з умови міцності за формулою (3.19):

$$[F]_{\text{н}} = 2,027557 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допустиме осьове зусилля, що розтягує розраховуємо за формулою (3.20):

$$[F] = 1,824797 \cdot 10^6 \text{ Н}, 1,824797 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 8,13229 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Висновок: Умову міцності та стійкості виконано.

Обичайка, що працює під спільною дією внутрішнього тиску, осьового розтягуючого зусилля і згинального моменту.

Перевірку умови міцності проведемо за відношенням (3.21): $0,6935666 \leq 1$

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахунок за умов випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T : 20 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск (з урахуванням гідростатичного), p : 2,073 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M : 0 Н м

Розрахункове поперечне зусилля Q : 0 Н

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, F : $5,262097 \cdot 10^5$ Н

За EN 13445 розрахунок на міцність при випробуваннях не проводиться, якщо виконано умову (3.18): $2,239099$ МПа $\geq 2,073$ МПа.

Допустимі напруження для матеріалу 12X18H10T при температурі $t = 20^\circ\text{C}$ (умова гідровипробувань) за формулою (3.5): $[\sigma]^{20} = 250,9091$ МПа

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12X18H10T при температурі 20°C : $E^{20} = 2 \cdot 10^5$ МПа

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1. [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 4,471647$ МПа

$4,471647$ МПа $\geq 2,073$ МПа

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$s_p + c = 4,766685$ мм

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 164,2393$ мм

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

Мінімальна відстань між “одиначними” штуцерами за формулою (3.17):

$$b_0 = 120 \text{ мм}$$

Обичайка, навантажена осьовим зусиллям, що розтягує (п. 2.3.3 [10]).

Допустиме осьове стискаюче зусилля з умови міцності за формулою (3.19):

$$[F]_{\text{п}} = 2,866092 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допустиме осьове зусилля, що розтягує розрахуємо за формулою (3.20):

$$[F] = 2,579483 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2,579483 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 5,262097 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Висновок: Умову міцності та стійкості виконано.

Обичайка, що працює під спільною дією внутрішнього тиску, осьового розтягуючого зусилля і згинального моменту.

Перевірку умови міцності проведемо за відношенням (3.21): $0,4312247 \leq 1$

Висновок: Умову міцності виконано.

Верхня теплообмінна секція. Кожух теплообмінника

Розрахунок проведемо згідно з методикою наведеною вище для нижньої теплообмінної секції:

Розрахункова схема наведена на рисунку 3.4

Вихідні дані:

Матеріал: 16ГС

Внутрішній діаметр D: 600 мм

Товщина стінки, s: 6 мм

Добавка для компенсації корозії та ерозії, s_1 : 2 мм.

Сума додатків до розрахункової товщини стінки, s: 2 мм

Довжина обичайки, L: $5,2 \cdot 10^3$ мм

Коефіцієнти міцності зварних швів:

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

Поздовжній шов: $\phi_p = 0,9$

Окружний шов: $\phi_T = 0,9$

Розрахунок у робочих умовах

Умови навантаження

Розрахункова температура, $T: 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, $p: 0,6 \text{ МПа}$

Розрахунковий згинальний момент, $M: 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Розрахункове поперечне зусилля $Q: 0 \text{ Н}$

Розрахункове осьове зусилля, що розтягує, $F: 0 \text{ Н}$

Результати розрахунку:

Допустима напруга для матеріалу 16ГС при температурі $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (робочі умови): $[\sigma] = 184 \text{ МПа}$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 16ГС при температурі $70 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$E = 1,94 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском(п. 2.3.1. [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 2,193377 \text{ МПа}$

$$2,193377 \text{ МПа} \geq 0,6 \text{ МПа}$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$$s_p + c = 3,088929 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 281,528 \text{ мм}$

Мінімальна відстань між “одиночними” штуцерами за формулою (3.17):

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

$$b_0 = 97,97959 \text{ мм}$$

Розрахунок за умов випробувань (Гідровипробування)

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T : 20 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск (з урахуванням гідростатичного), p : 0,9 МПа

Допустимі напруження для матеріалу 16ГС при температурі $t = 20^\circ\text{C}$ (умова гідровипробувань) визначимо за формулою (3.5): $[\sigma]^{20} = 272,7273 \text{ МПа}$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 16ГС при температурі 20°C:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Розрахунок на міцність та стійкість за EN 13445 [10]

Гладка обичайка, навантажена внутрішнім надлишковим тиском (п. 2.3.1 [10]).

Допустимий тиск за формулою (3.14): $[p] = 3,251054 \text{ МПа}$

$$3,251054 \text{ МПа} \geq 0,9 \text{ МПа}$$

Висновок: Умову міцності виконано.

Розрахункова товщина стінки з урахуванням додатків за формулою (3.15):

$$s_p + c = 3,10202 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр одиночного отвору, що не вимагає зміцнення за формулою(3.16): $d_0 = 277,2525 \text{ мм}$

Мінімальна відстань між “одиночними” штуцерами за формулою (3.17):

$$b_0 = 97,97959 \text{ мм}$$

3.2 Розрахунок зміцнення отворів

Основний корпус, днище і кришка обладнання забезпечують необхідну кількість роз'ємів для підключення технологічних ліній, перевірки та ремонту обладнання тощо. Ці отвори не тільки зменшують несучу поверхню матеріалу

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

корпусу або днища кришки, але також спричиняють значну концентрацію напруги біля країв отворів.

Розрахунковий діаметр окремого отвору, що не потребує армування, визначаємо за формулою [11,(18,60)]:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} \quad (3.22)$$

Де s_p – номінальна розрахункова товщина стінки обичайки без прибавок на корозію при $\varphi = 0,9$; $s_p = 1,191192$ мм.

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{6-2}{1,191192} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{600 \cdot (6-2)} = 250,63 \text{ мм}$$

Таблиця 3.1 – Найменування та умовний прохід штуцерів, мм

Позначення	Найменування	Кіл.	Умовний прохід D_y мм
А	Вхід кислоти	1	50
Б	Вхід рідкого аміаку	1	50
В	Вихід парів аміаку	1	200
Г	Вхід парів аміаку	1	200
Д	Вихід циркуляційної рідини	1	100
Е	Вхід циркуляційної рідини	1	100
Ж	Вхід охолоджуючої води	1	150
И	Вихід охолоджуючої води	1	150
К	Дренаж	1	20
Л	Дренаж	1	20
М	Дренаж	1	M16

Таким чином, розрахунковий діаметр одного отвору без арматури становить 250 мм. Укріплення отворів не здійснюємо.

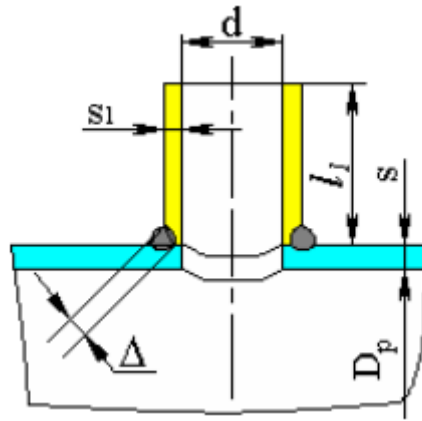


Рисунок 3.5 – Конструктивна схема штуцера

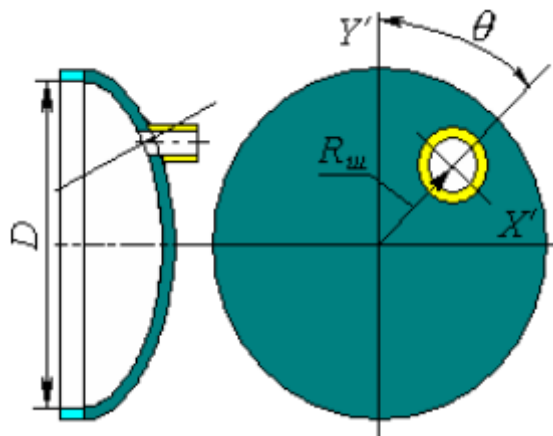


Рисунок 3.6 – Схема розташування штуцера

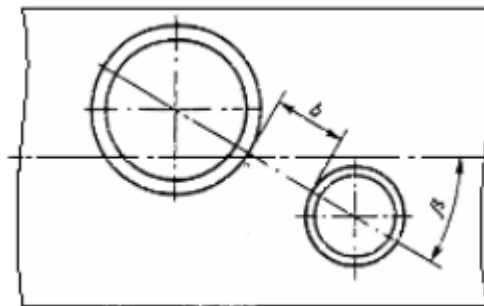


Рисунок 3.7 – Розташування взаємно впливають отворів

3.3 Розрахунок фланцевого з'єднання

Розрахунок на міцність та герметичність по ПД26-15-88 [12], [13]

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TTP.00.00.00 ПЗ

Лист

77

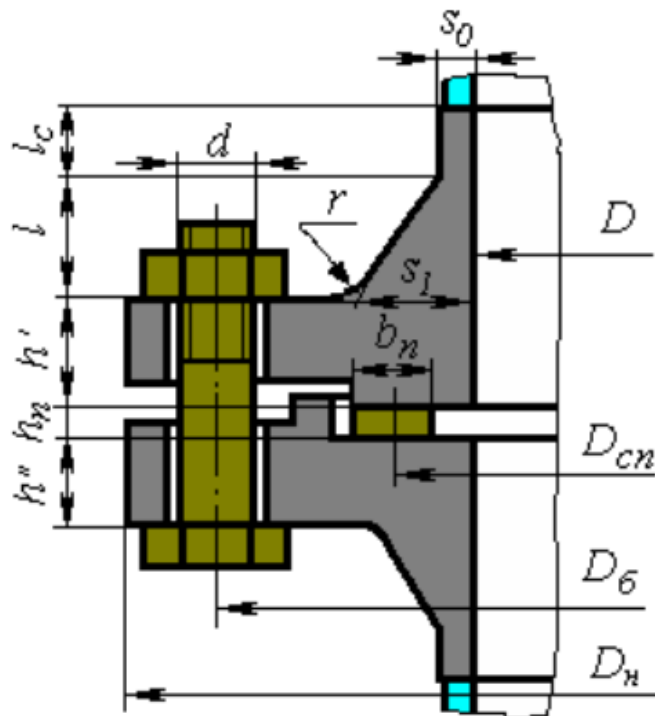


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема фланцевого з'єднання

Вихідні данні

Тип фланців:Зварювання

Виконання: Виступ впадина

Діаметр болтової округлості, D_6 :700 мм

Болти:

Матеріал:35

Зовнішній діаметр, d :20 м

Кількість, n :32

Контроль затягування:Немає

Прокладки:

Матеріал прокладки:

Пароніт за Державного

стандарту 481-80 при товщині трохи більше 2 мм.

Товщина $h_п$:2 мм

Середній діаметр, $D_{сп}$:650 мм

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TTP.00.00.00 ПЗ

Лист

78

Ширина b_n : 13 мм

Дані першого фланця (кільця):

Матеріал фланця (кільця): 12X18H10T

Суміжний елемент: Днище еліптичне нижнє

Матеріал суміжного елемента: 12X18H10T

Внутрішній діаметр фланця (кільця), D : 600 мм

Зовнішній діаметр фланця (кільця), D_n : 740 мм

Висота фланця (кільця), h : 50 мм

Сума надбавок, c : 2 мм

Довжина конічної частини втулки l : 35 мм

Довжина циліндричної частини втулки, l_c : 0 мм

Товщина циліндричної частини втулки, s_0 : 12 мм

Товщина конічної частини втулки, s_1 : 24 мм

Радіус переходу, r : 7 мм

Дані другого фланця (кільця):

Матеріал фланця (кільця): 12X18H10T

Суміжний елемент: Розподільча камера

Матеріал суміжного елемента: 12X18H10T

Внутрішній діаметр фланця (кільця), D : 600 мм

Зовнішній діаметр фланця (кільця), D_n : 740 мм

Висота фланця (кільця), h : 47 мм

Сума надбавок, c : 2 мм

Довжина конічної частини втулки l : 35 мм

Довжина циліндричної частини втулки, l_c : 0 мм

Товщина циліндричної частини втулки, s_0 : 12 мм

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		79

Товщина конічної частини втулки, s_1 : 24 мм

Радіус переходу, r : 7 мм

Розрахунок в робочих умовах:

Умови навантаження:

Розрахункова температура, T : 70 °С

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск згідно [19], p : 1,691787 МПа

Результати розрахунку:

Розрахункова температура елементів з'єднання (за табл. 1 [12], [13]):

Температура фланця (кільця), t_ϕ : 67,2 °С

Температура болтів (шпильок), t_b : 59,5 °С

Допустима напруга для болтів (шпильок)

Допустима напруга для сталі 35 при температурі 59,5°С (робочі умови):

$[\rho]_\sigma = 128$ МПа

Модуль поздовжньої пружності сталі 35 при температурі 59,5°С:

$E_b = 2 \cdot 10^5$ МПа

Коефіцієнт лінійного розширення сталі 35 при температурі 59,5°С:

$\alpha_b = 0,111 \cdot 10^{-4}$ 1/С

Допустима напруга для сталі 35 при температурі 20°С (робочі умови):

$[\sigma]_{20} = 130$ МПа

Модуль поздовжньої пружності сталі 35 при температурі 20°С:

$E_b^{20} = 2 \cdot 10^5$ МПа

Допустима напруга для суміжного елемента фланця 1 Днище еліптичне
нижнє

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 70$ °С

(умови праці): $[\rho]_{ш1} = 177,5$ МПа

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 20^{\circ}\text{C}$

(умови праці): $[\rho]_{ш1}^{20} = 184 \text{ МПа}$

Допустима напруга для суміжного елемента фланця 2 Розподільна камера

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 70^{\circ}\text{C}$

(умови праці): $[\rho]_{ш2} = 177,5 \text{ МПа}$

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $t = 20^{\circ}\text{C}$

(умови праці): $[\rho]_{ш2}^{20} = 184 \text{ МПа}$

Допустима напруга для фланця (кільця) 1

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $67,2^{\circ}\text{C}$

(умови праці):

$$[\sigma]_1 = \eta \cdot \min \{ R_e / n_T; P_M / n_B \} = 1 \cdot \min (267 / 1,5; 516 / 2,4) = 178 \text{ МПа}$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12Х18Н10Т за температури

$$67,2^{\circ}\text{C}: E_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт лінійного розширення для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $67,2^{\circ}\text{C}$: $\alpha_1 = 0,16836 \cdot 10^{-4} \text{ 1/C}$

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі 20°C (робочі умови):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot \min \{ R_e^{20} / n_T; R_m^{20} / n_B \} = 1 \cdot \min (276 / 1,5; 540 / 2,4) = 184 \text{ МПа}$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12Х18Н10Т за температури 20°C : $E^{20}_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Допустима напруга для фланця (кільця) 2

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі $67,2^{\circ}\text{C}$

(умови праці):

$$[\sigma]_2 = \eta \cdot \min \{ R_e / n_T; P_M / n_B \} = 1 \cdot \min (267 / 1,5; 516 / 2,4) = 178 \text{ МПа}$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12Х18Н10Т за температури

$$67,2^{\circ}\text{C}: E_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

Коефіцієнт лінійного розширення для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі 67,2°С: $\alpha_2 = 0,16836 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

Допустима напруга для матеріалу 12Х18Н10Т при температурі 20°С (робочі умови):

$$[\sigma]^{20}_2 = \eta \min\{R_e^{20}/n_T; R_m^{20}/n_B\} = 1 \min(276/1,5; 540/2,4) = 184 \text{ МПа}$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу 12Х18Н10Т за температури 20°С: $E^{20}_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Розрахункові параметри болтів (шпильок):

Робоча довжина болта (шпильки):

$$L_{60} = h' + h'' + h_{\text{п}} = 50 + 47 + 2 = 99 \text{ мм} \quad (3.23)$$

Площа перерізу болта (по внутрішньому діаметру різьби): $f_6 = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Ефективна довжина болта:

$$L_6 = L_{60} + 0,28 \cdot d = 99 + 0,28 \cdot 20 = 104,6 \text{ мм} \quad (3.24)$$

Податливість болтів (п.3.4 [15]):

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} \cdot f_6 \cdot n} = 104,6 / (2 \cdot 10^5 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot 32) = 0,7263889 \cdot 10^{-7} \text{ мм / Н} \quad (3.25)$$

Розрахункові параметри першого фланця (п.3.6 [12], [13]):

$$\beta = \frac{(s_1 - c)}{(s_0 - c)} = (24 - 2) / (12 - 2) = 2,2 \quad (3.26)$$

$$x = \frac{1}{\sqrt{(D + 2c) \cdot (s_0 - c)}} = \frac{35}{\sqrt{(600 + 2 \cdot 2) \cdot (12 - 2)}} = 0,4503494 \quad (3.27)$$

$$k = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{x}{1 + \beta} = 1 + (2,2 - 1) \cdot \frac{0,4503494}{1 + 2,2} = 1,432215 \quad (3.28)$$

Еквівалентна товщина втулки для фланця, приварного встик (п.3.6.1 [12], [13]):

$$s_3 = k \cdot (s_0 - c) = 1,432215 \cdot (12 - 2) = 14,32215 \text{ мм} \quad (3.29)$$

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(D + 2 \cdot c) \cdot s_3}} = \frac{500}{\sqrt{(600 + 2 \cdot 2) \cdot 14,32215}} = 0,5375854 \quad (3.30)$$

$$\psi_1 = 1,28 \cdot \lg(740 / (600 + 2 \cdot 2)) = 0,1128893 \quad (3.31)$$

$$j = \frac{h}{s_3} = 50 / 14,32215 = 3,491097 \quad (3.32)$$

$$w = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \lambda \cdot (1 + \psi_1 \cdot j^2)} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,5053303 \cdot (1 + 0,1128893 \cdot 3,281631^2)} = 0,4980819 \quad (3.32)$$

$$\psi_r = \frac{D_H + D + 2 \cdot c}{D_H - D - 2 \cdot c} = \frac{740 + 600 + 2 \cdot 2}{740 - 600 - 2 \cdot 2} = 9,882353 \quad (3.33)$$

Кутова податливість фланця (кільця) (п.3.6.3 [12], [13]):

$$y_\phi = \frac{[1 - w \cdot 1 + 0,9 \cdot \lambda] \cdot \psi_r}{E^{20} \cdot h^3} = \frac{[1 - 0,4980819 \cdot 1 + 0,9 \cdot 0,5053303] \cdot 9,882353}{2 \cdot 10^5 \cdot 47^3} = 0,750949 \cdot 10^{-5} \text{ гр} / \text{Н} \cdot \text{м} \quad (3.34)$$

Кутова податливість фланця, навантаженого зовнішнім згинальним моментом

(П.3.9 [12], [13]):

$$y_\phi M = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E^{20} \cdot D_H \cdot h^3} = \left(\frac{3,141593}{4}\right)^3 \cdot \frac{700}{2 \cdot 10^5 \cdot 740 \cdot 47^3} = 0,1264547 \cdot 10^{-5} \text{ гр} / \text{Н} \cdot \text{м} \quad (3.35)$$

Плечі моментів (п.3.10 [12], [13]):

$$a = 0$$

$$b = 0,5 \cdot (D_6 - D_{\text{сп}}) = 0,5 \cdot (700 - 650) = 25 \text{ мм} \quad (3.36)$$

$$e = 0,5 \cdot (D_{\text{сп}} - (D + 2 \cdot c) - s_3) = 0,5 \cdot (650 - (600 + 2 \cdot 2) - 14,32215) = 15,83893 \text{ мм} \quad (3.37)$$

Таблиця 3.2 – Характеристики прокладання (за табл. 4 [12], [13])

Тип і матеріал	Коефіцієнт, м	Питомий тиск	Допустимий питомий тиск	Коефіцієнт про	Умовний модуль
----------------	---------------	--------------	-------------------------	----------------	----------------

(3.41)

Навантаження від температурних деформацій (п. 5.3 [12], [13]):

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t} (a'_\phi \cdot h' \cdot (t_\phi - 20^\circ\text{C}) - a''_\phi \cdot h'' (t_\phi - 20^\circ\text{C}) - a_6 \cdot l_{60} \cdot (t_6 - 20^\circ\text{C})) \quad (3.42)$$

$$Q_t = \frac{1}{0,2649692 \cdot 10^{-6}} (0,16836 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot (67,2 - 20^\circ\text{C}) - 0,16836 \cdot 10^{-4} \cdot 47(67,2 - 20^\circ\text{C}) - 0,111 \cdot 10^{-4} \cdot 99(59,5 - 20^\circ\text{C})) = 1,270917 \cdot 10^5 \text{ Н} \quad (3.43)$$

$$\eta = y_\Pi + y_6 + y'_\phi \cdot b'^2 + y''_\phi \cdot b''^2 \quad (3.44)$$

$$\eta = 0,3390283 \cdot 10^{-7} + 0,7263889 \cdot 10^{-7} + 0,7014076 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2 + 0,750949 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2 = 0,2649692 \cdot 10^{-6} \text{ мм / Н}$$

Коефіцієнти жорсткості для фланцевого з'єднання, навантаженого внутрішнім тиском і зовнішньою осьювою силою (п. 4.1 з урахуванням змін. 1 [12], [13]):

$$a = \max \left\{ 1 - \frac{0,3390283 \cdot 10^{-7} - 0,7014076 \cdot 10^{-5} \cdot 15,83893 \cdot 25 + 0,750949 \cdot 10^5 \cdot 15,83893 \cdot 25}{0,2649692 \cdot 10^{-6}}; 1,0 \right\} = 1,250859$$

$$\beta_M = \frac{y'_{\phi M} b' e' \left(1 - \frac{e'}{D_{\text{сп}}} \right) + y''_{\phi M} b'' e'' \left(1 - \frac{e''}{D_{\text{сп}}} \right) - y_\Pi \left(\frac{D_6}{D_{\text{сп}}} \right)^2}{y_6 + y_\Pi \left(\frac{D_6}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + y'_{\phi M} b'^2 y''_{\phi M} b''^2} \quad (3.45)$$

$$\beta_M = \frac{0,1050313 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \cdot 15,83893 \left(1 - \frac{15,83893}{650} \right) + 0,1264547 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \cdot 15,83893 \left(1 - \frac{15,83893}{650} \right) - 0,3390283 \cdot 10^{-7} \left(\frac{700}{650} \right)^2}{0,7263889 \cdot 10^{-7} + 0,3390283 \cdot 10^{-7} \left(\frac{700}{650} \right)^2 + 0,1050313 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2 + 0,1050313 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2} = -0,172809$$

Коефіцієнти жорсткості для фланцевого з'єднання, навантаженого зовнішнім згибаючим моментом (п. 4.2 [12], [13]):

$$a_M = -(1 + \beta_M) = -(1 + (-0,172809)) = -0,827191 \quad (3.46)$$

Болтове навантаження P_6 в умовах монтажу (п. 5.4 [12], [13]):

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

$$P_6 = \max \left\{ \begin{array}{l} a \cdot (Q_d + F) + R_{II} - Q_t + \left| \frac{4 \cdot a_M \cdot M}{D_{сп}} \right| \\ 0,5 \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж} \\ 0,4 \cdot [\sigma]_6^{20} \cdot n \cdot f_6 \end{array} \right\} \quad (3.47)$$

$$P_6 = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,250859 \cdot (5,613868 \cdot 10^5 + 0) + 1,122774 \cdot 10^{-5} - 0 + \left| \frac{4 \cdot (-0,827191) \cdot 0}{650} \right| = 8,144934 \cdot 10^5 \\ 0,5 \cdot 3,141593 \cdot 650 \cdot 13 \cdot 20 = 2,654646 \cdot 10^5 \\ 0,4 \cdot 130 \cdot 32 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3} = 3,744 \cdot 10^5 \end{array} \right\} =$$

$$= 8,144934 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

де $F < 0$, якщо зусилля стискає; Q_t враховується лише за $Q_t < 0$;

Збільшення навантаження в болтах (шпильках) у робочих умовах (п. 5.5 [12], [13]):

$$\Delta P_6 = (1 - \alpha)(Q_d + F) + Q_t + \frac{4\beta_M M}{D_{сп}} \quad (3.48)$$

$$\Delta P_6 = (1 - 1,250859)(5,613868 \cdot 10^5 + 0) + 1,270917 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot (-0,172809) \cdot 0}{650} =$$

$$= -1,373751 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Розрахунок болтів (шпильок) [12], [13]:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6}{n \cdot f_6} \leq \xi \cdot [\sigma]_6^{20} \quad (3.49)$$

$$\sigma_{61} = \frac{8,144934 \cdot 10^5}{32 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3}} = 113,1241 \text{ МПа}$$

$$\xi \cdot [\sigma]_6^{20} = 1,1 \cdot 130 = 143 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{62} = \frac{P_6 + \Delta P_6}{n \cdot f_6} = \frac{8,144934 \cdot 10^5 + (-1,373751 \cdot 10^4)}{32 \cdot 0,225 \cdot 10^{-3}} = 111,2161 \text{ МПа} \quad (3.50)$$

Де $\xi = 1,1 \dots 1,2$, прийнято $\xi = 1,1$

$$[\sigma]_6 = 128 \text{ МПа}$$

$113,1241 \text{ МПа} \leq 143 \text{ МПа}$, Умова міцності виконана

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

111,2161 МПа ≤ 128 МПа , Умова міцності виконана

Умова міцності виконана

Розрахунок прокладки [12], [13]:

Умова міцності м'яких прокладок:

$$q = \frac{P_6}{\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} \leq [q] \quad (3.51)$$

$$q = \frac{P_6}{\pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_{\text{п}}} = \frac{8,144934 \cdot 10^5}{3,141593 \cdot 650 \cdot 13} = 30,68181 \text{ МПа} \quad (3.52)$$

[q] = 130 МПа

Умову працездатності виконано.

Розрахунок першого фланця [12], [13]:

T = 1,828727, визначається [12], [13]

Згинальний момент при затягуванні:

$$M_{01} = P_6 \cdot b = 8,144934 \cdot 10^5 \cdot 25 = 2,036234 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.53)$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c), (D + 2 \cdot c) \geq 10 \cdot (s_1 - c) = 600 + 2 \cdot 2 \quad (3.54)$$

Коли $(600 + 2 \cdot 2) \geq 20 \cdot (24 - 2) = 604 \text{ мм}$

$$\sigma_1 = \frac{T \cdot w \cdot M_{01}}{D^* \cdot (s_1 - c)^2} = \frac{1,828727 \cdot 0,4980819 \cdot 2,036234 \cdot 10^4}{604 \cdot (24 - 2)^2} = 59,25908 \text{ МПа} \quad (3.55)$$

Осьова напруга при затяжці в обичайці (втулці) на зовнішній та внутрішній поверхнях ([12], [13]):

- у перерізі s_1 :

$$\sigma_{11} = \sigma_1 = 59,265908 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{12} = -\sigma_1 = -59,265908 \text{ МПа}$$

Кут повороту фланця (кільця) при затягуванні (п.8.1 [12], [13]):

$$\theta = M_{01} \cdot \frac{(1 - w \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)) \cdot \psi_r}{E^{20} \cdot h^3} = 2,036234 \cdot 10^4 \cdot \frac{(1 - 0,4352226 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,5375854)) \cdot 9,882354}{2 \cdot 10^5 \cdot 50^3} = 0,142823^\circ \quad (3.56)$$

Окружна напруга в обичайці (втулці) ([12], [13]):

- у перерізі s_1 :

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

$$\sigma_{13} = \frac{E^{20} \cdot h \cdot \theta}{(D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 0,142823}{600 + 2 \cdot 2} + 0,3 \cdot 59,25908 =$$

$$= 59,04811 \text{ МПа} \quad (3.57)$$

$$\sigma_{14} = \frac{E^{20} \cdot h \cdot \theta}{(D + 2 \cdot c)} - 0,3 \cdot \sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 0,142823}{600 + 2 \cdot 2} - 0,3 \cdot 59,25908 =$$

$$= 23,49266 \text{ МПа} \quad (3.58)$$

Умова міцності у перерізі s1 (п. 8.7 [12], [13]):

При затягуванні:

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{11}\sigma_{13}}}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{14}^2 - \sigma_{12}\sigma_{14}}} \right\} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_{\phi}^{20} \quad (3.59)$$

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{59,25908^2 + 59,04811^2 - 59,25908 \cdot 59,04811}}{-59,25908^2 + 23,49266^2 - (-59,25908) \cdot 23,49266} \right\} = 73,86269 \text{ МПа}$$

$$1,5 \cdot [\sigma]_{\phi}^{20} = 1,5 \cdot 184 = 276 \text{ МПа}$$

73,86269 МПа ≤ 276 МПа, Умова міцності виконана.

$$\Delta\sigma_M = \frac{Q_d + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{сн}}} + F}{\pi \cdot (D + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} = \frac{5,613868 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot 0}{650} + 0}{3,141593 \cdot (600 + 2 \cdot 2) \cdot (24 - 2)} = 13,44785 \text{ МПа}$$

$$(3.60)$$

$$\Delta M_{01} = \Delta P_6 \cdot b + \left(Q_d + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{сн}}} + F \right) \cdot e = -1,373751 \cdot 10^4 + \left(5,613868 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot 0}{650} + 0 \right) \cdot 15,83893 =$$

$$= 8,548327 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.60)$$

$$\Delta\sigma_1 = \frac{T \cdot w \cdot \Delta M_{01}}{D^* \cdot (s_1 - c)^2} = \frac{1,828727 \cdot 0,4652226 \cdot 8,548327 \cdot 10^3}{604 \cdot (24 - 2)^2} = 24,8776 \text{ МПа} \quad (3.61)$$

$$\sigma_{11} = \Delta\sigma_M + \Delta\sigma_1 = 13,44785 + 24,8776 = 38,32545 \text{ МПа} \quad (3.62)$$

$$\sigma_{12} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1 = 13,44785 - 24,8776 = -11,42975 \text{ МПа} \quad (3.63)$$

Прирости осьових напружень в оболонці (втулка) (п. 8.4 [12], [13]):

– у поперечному перерізі s1:

Приріст кута повороту фланця (п. 8.2 [12], [13]):

$$\Delta\theta = \Delta M_{01} \cdot \frac{(1 - w \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)) \cdot \psi_r}{E \cdot h^3} = 8,548327 \cdot 10^3 \cdot \frac{(1 - 0,465226 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,5375854)) \cdot 9,882353}{2 \cdot 10^5 \cdot 50^3} = 0,05995862^\circ \quad (3.64)$$

Прирости окружних напружень в оболонці (втулка) (стор. 8.6 [12], [13]):

$$\sigma_{13} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 \quad (3.65)$$

$$\sigma_{13} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 0,05995832}{600 + 2 \cdot 2} + \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{740 - (600 + 2 \cdot 2)} + 0,3 \cdot 24,8776 = 32,30255 \text{ МПа} \quad (3.66)$$

$$\sigma_{14} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} - 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 \quad (3.67)$$

$$\sigma_{14} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 0,05995832}{600 + 2 \cdot 2} + \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{740 - (600 + 2 \cdot 2)} - 0,3 \cdot 24,8776 = 17,37599 \text{ МПа}$$

В умовах праці:

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{11} + \Delta\sigma_{11})^2 + (\sigma_{13} + \Delta\sigma_{13})^2} - (\sigma_{11} + \Delta\sigma_{11})(\sigma_{13} + \Delta\sigma_{13})}{\sqrt{(\sigma_{12} + \Delta\sigma_{12})^2 + (\sigma_{14} + \Delta\sigma_{14})^2} - (\sigma_{12} + \Delta\sigma_{12})(\sigma_{14} + \Delta\sigma_{14})} \right\} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_\phi$$

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(59,25908 + 38,32545)^2 + (59,04811 + 32,30255)^2} - \sqrt{(-59,25908 + (-11,42975))^2 + (23,49266 + 17,37599)^2} - \sqrt{(59,25908 + 38,32545)(59,04811 + 32,30255)}}{\sqrt{(-59,25908 + (-11,42975))(23,49266 + 17,37599)}} \right\} =$$

$$= 97,75539 \text{ МПа}$$

$$1,5 \cdot [\sigma]_\phi = 1,5 \cdot 178 = 267 \text{ МПа}$$

97,75539 МПа ≤ 267 МПа, Умова міцності виконана

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A} \right\} = \max \left\{ \frac{3,78449}{1 + 1,2} \right\} = 1,720223 \quad (3.68)$$

– у поперечному перерізі s0:

					XI. ТГР.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

$$\sigma_{21} = f \cdot \sigma_1 = 1,720223 \cdot 59,25908 = 101,9388 \text{ МПа} \quad (3.69)$$

$$\sigma_{22} = -f \cdot \sigma_1 = -1,720223 \cdot 59,25908 = -101,9388 \text{ МПа} \quad (3.70)$$

– у поперечному перерізі s0:

$$\sigma_{23} = 0,3 \cdot f \cdot \sigma_1 = 0,3 \cdot 1,720223 \cdot 59,25908 = 30,58164 \text{ МПа} \quad (3.71)$$

$$\sigma_{24} = 0,3 \cdot f \cdot \sigma_1 = -0,3 \cdot 1,720223 \cdot 59,25908 = -30,58164 \text{ МПа} \quad (3.72)$$

Стан міцності в поперечному перерізі s0: При затягуванні:

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21}\sigma_{23}}}{\sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22}\sigma_{24}}} \right\} \leq \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{еф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right. \\ \left. \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ем}}^{20}}{R_{\text{мм}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{м}}^{20} \right\} \quad (3.73)$$

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{101,9388^2 + 30,58164^2 - 101,9388 \cdot 30,58164}}{\sqrt{(-101,9388)^2 + (-30,58164)^2 - (-101,9388) \cdot (-30,58164)}} \right\} = \\ = 90,6052 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{еф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right. \\ \left. \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ем}}^{20}}{R_{\text{мм}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{м}}^{20} \right\} = \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{276}{540} \right) \cdot 184 \right. \\ \left. \left(4,5 - 2,0 \frac{276}{540} \right) \cdot 184 \right\} = 639,9111 \text{ МПа} \quad (3.74)$$

90,6052 МПа ≤ 639,9111 МПа, Умова міцності виконана

$$\Delta\sigma_M = \frac{Q_d + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{сп}}} + F}{\pi \cdot (D + 2 \cdot c) \cdot (s_0 - c)} = \frac{5,613868 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot 0}{650} + 0}{3,141593 \cdot (600 + 2 \cdot 2) \cdot (12 - 2)} = 29,58526 \text{ МПа} \quad (3.75)$$

– у поперечному перерізі s0:

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma_M + f \cdot \Delta\sigma_1 = 29,58526 + 1,720223 \cdot 24,8776 = \\ = 72,38027 \text{ МПа} \quad (3.76)$$

$$\Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - f \cdot \Delta\sigma_1 = 29,58526 - 1,720223 \cdot 24,8776 = \\ = -13,20975 \text{ МПа} \quad (3.77)$$

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s_0 - c)} + 0,3 \cdot f \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{2 \cdot (12 - 2)} +$$

$$+ 0,3 \cdot 1,720223 \cdot 24,8776 = 63,93046 \text{ МПа} \quad (3.78)$$

$$\Delta\sigma_{24} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s_0 - c)} - 0,3 \cdot f \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{2 \cdot (12 - 2)} -$$

$$- 0,3 \cdot 1,720223 \cdot 24,8776 = 38,25346 \text{ МПа} \quad (3.79)$$

В умовах праці:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})^2 + (\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})^2 - (\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})(\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})}}{\sqrt{(\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})^2 + (\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})^2 - (\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})(\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})}} \right\} \leq$$

$$\leq \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ef}}^{20}}{R_{\text{mf}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right\} \quad (3.80)$$

$$\left\{ \left(\left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{em}}^{20}}{R_{\text{mш}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ш}}^{20} \right) \right\}$$

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{101,9388 + 72,38027)^2 + (30,58164 + 63,93046)^2 - (-101,9388 + 72,38027)(30,58164 + 63,93046)}{(-101,9388 + (-13,20975))^2 + (-30,58164 + 38,25346)^2 - (-(-101,9388 + (-13,20975))(-30,58164 + 38,25346))} \right\} =$$

$$= 151,1437 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ef}}^{20}}{R_{\text{mf}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right\} = \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{267}{516} \right) \cdot 184 \right\} = 615,0581 \text{ МПа}$$

$$\left\{ \left(\left(4,5 - 2,0 \frac{267}{516} \right) \cdot 177,5 \right) \right\} \quad (3.81)$$

151.1437 МПа ≤ 615.0581 МПа , Умову міцності виконано.

Міцність обумовлена дотриманням.

Жорсткість фланця (с. 11 [12], [13]):

Допустимий кут повороту для зварних стикових фланців в умовах експлуатації:

[θ]=0,009 рад при D ≤ 2000 мм Умова жорсткості фланця:

$$\theta + \Delta\theta \leq [\theta] = 0,142823 + 0,05995862 = 0,2027816 \text{ градус} \leq 0,515662 \text{ градус}$$

Виконується умова жорсткості.

Розрахунок другого фланця (п. 8 [12], [13]): $T = 1,828727$, визначається ознаками. 8 [12], [13]

Згинальний момент при затягуванні:

$$M_{01} = P_6 \cdot b = 8,144934 \cdot 10^5 \cdot 25 = 2,036234 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$D^* = (D + 2 \cdot c) \geq 10 \cdot (s_1 - c) = 600 + 2 \cdot 2 \text{ Коли}$$

$$(600 + 2 \cdot 2) \geq 20 \cdot (24 - 2) = 604 \text{ мм}$$

$$\sigma_1 = \frac{T \cdot w \cdot M_{01}}{D^* \cdot (s_1 - c)^2} = \frac{1,828727 \cdot 0,4652226 \cdot 2,036234 \cdot 10^4}{604 \cdot (24 - 2)^2} = 63,44463 \text{ МПа}$$

Осьова напруга при затяжці в обичайці (втулці) на зовнішній та внутрішній поверхнях ([12], [13]):

– у перерізі s_1 :

$$\sigma_{11} = \sigma_1 = 63,44463 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{12} = -\sigma_1 = -63,44463 \text{ МПа}$$

Кут повороту фланця (кільця) при затягуванні (п.8.1 [12], [13]):

$$\theta = M_{01} \cdot \frac{(1 - w \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)) \cdot \psi_r}{E^{20} \cdot h^3} = 2,036234 \cdot 10^4 \cdot \frac{(1 - 0,4980819 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,5053303)) \cdot 9,882354}{2 \cdot 10^5 \cdot 47^3} = 0,1529107^\circ$$

Окружна напруга в обичайці (втулці) ([12], [13]):

– у перерізі s_1 :

$$\sigma_{13} = \frac{E^{20} \cdot h \cdot \theta}{(D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 47 \cdot 0,1529107}{600 + 2 \cdot 2} + 0,3 \cdot 63,44463 = 60,56763 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{14} = \frac{E^{20} \cdot h \cdot \theta}{(D + 2 \cdot c)} - 0,3 \cdot \sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 47 \cdot 0,1529107}{600 + 2 \cdot 2} - 0,3 \cdot 63,44463 = 22,50085 \text{ МПа}$$

Умова міцності у перерізі s_1 (п. 8.7 [12], [13]):

При затягуванні:

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{11}\sigma_{13}}}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{14}^2 - \sigma_{12}\sigma_{14}}} \right\} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_{\phi}^{20}$$

						<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			92

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{63,44463^2 + 60,56763^2 - 63,44463 \cdot 60,56763}}{-63,44463^2 + 22,50085^2 - (-63,44463) \cdot 22,50085} \right\} = 77,195 \text{ МПа}$$

$$1,5 \cdot [\sigma]_{\phi}^{20} = 1,5 \cdot 184 = 276 \text{ МПа}$$

77,195 МПа ≤ 276 МПа, умова міцності виконана.

$$\Delta\sigma_M = \frac{Q_d + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{сп}}} + F}{\pi \cdot (D + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} = \frac{5,613868 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot 0}{650} + 0}{3,141593 \cdot (600 + 2 \cdot 2) \cdot (24 - 2)} = 13,44785 \text{ МПа}$$

$$\Delta M_{01} = \Delta P_6 \cdot b + \left(Q_d + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{сп}}} + F \right) \cdot e = -1,373751 \cdot 10^4 + \left(5,613868 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot 0}{650} + 0 \right) \cdot 15,83893 = 8,548327 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\Delta\sigma_1 = \frac{T \cdot w \cdot \Delta M_{01}}{D^* \cdot (s_1 - c)^2} = \frac{1,828727 \cdot 0,4980819 \cdot 8,548327 \cdot 10^3}{604 \cdot (24 - 2)^2} = 26,63474 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{11} = \Delta\sigma_M + \Delta\sigma_1 = 13,44785 + 26,63474 = 40,08259 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{12} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1 = 13,44785 - 26,63474 = -13,18689 \text{ МПа}$$

Прирости осьових напружень в оболонці (втулка) (п. 8.4 [12], [13]): – у поперечному перерізі s1:

Приріст кута повороту фланця (п. 8.2 [12], [13]):

$$\Delta\theta = \Delta M_{01} \cdot \frac{(1 - w \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda)) \cdot \psi_r}{E \cdot h^3} = 8,548327 \cdot 10^3 \cdot \frac{(1 - 0,4980819 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,5053303)) \cdot 9,882353}{2 \cdot 10^5 \cdot 47^3} = 0,06419357^\circ$$

Прирости окружних напружень в оболонці (втулка) (стор. 8.6 [12], [13]):

$$\sigma_{13} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_{13} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 47 \cdot 0,06419357}{600 + 2 \cdot 2} + \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{740 - (600 + 2 \cdot 2)} + 0,3 \cdot 26,63474 = 32,94047 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{14} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} - 0,3 \cdot \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_{14} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\theta}{(D + 2 \cdot c)} + \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{D_H - (D + 2 \cdot c)} + 0,3 \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 0,06419357}{600 + 2 \cdot 2} + \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{740 - (600 + 2 \cdot 2)} - 0,3 \cdot 26,63474 = 16,95962 \text{ МПа}$$

В умовах праці:

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{11} + \Delta\sigma_{11})^2 + (\sigma_{13} + \Delta\sigma_{13})^2 - (\sigma_{11} + \Delta\sigma_{11})(\sigma_{13} + \Delta\sigma_{13})}}{\sqrt{(\sigma_{12} + \Delta\sigma_{12})^2 + (\sigma_{14} + \Delta\sigma_{14})^2 - (\sigma_{12} + \Delta\sigma_{12})(\sigma_{14} + \Delta\sigma_{14})}} \right\} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_{\phi}$$

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(63,44463 + 40,08259)^2 + (60,56763 + 32,94047)^2 - \sqrt{(-63,44463 + (-13,18689))^2 + (22,50085 + 16,95962)^2 - \sqrt{(63,44463 + 40,08259)(60,56763 + 32,94047)}}}{\sqrt{(-63,44463 + (-13,18689))((22,50085 + 16,95962))}} \right\} =$$

$$= 102,242 \text{ МПа}$$

$$1,5 \cdot [\sigma]_{\phi} = 1,5 \cdot 178 = 267 \text{ МПа}$$

102,242 МПа ≤ 267 МПа , Умова міцності виконана

$$f = \max \left\{ \frac{C_{36}}{1 + A}, 1,0 \right\} = \max \left\{ \frac{3,78449}{1 + 1,2}, 1,0 \right\} = 1,720223$$

– у поперечному перерізі s0:

$$\sigma_{21} = f \cdot \sigma_1 = 1,720223 \cdot 63,44463 = 109,1389 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{22} = -f \cdot \sigma_1 = -1,720223 \cdot 63,44463 = -109,1389 \text{ МПа}$$

– у поперечному перерізі S0:

$$\sigma_{23} = 0,3 \cdot f \cdot \sigma_1 = 0,3 \cdot 1,720223 \cdot 63,44463 = 32,74167 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{24} = 0,3 \cdot f \cdot \sigma_1 = -0,3 \cdot 1,720223 \cdot 63,44463 = -32,74167 \text{ МПа}$$

Стан міцності в поперечному перерізі s0: При затягуванні:

$$\sigma_{s1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21}\sigma_{23}}}{\sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22}\sigma_{24}}} \right\} \leq \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{еф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\phi}^{20}, \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ем}}^{20}}{R_{\text{мш}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ш}}^{20} \right\}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{109,1389^2 + 32,74167^2 - 109,1389 \cdot 32,74167}}{\sqrt{(-109,1389)^2 + (-32,74167)^2 - (-109,1389) \cdot (-30,5816432,74167)}} \right\} =$$

$$= 97,00477 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ef}}^{20}}{R_{\text{mf}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right\} = \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{276}{540} \right) \cdot 184 \right\} = 639,9111 \text{ МПа}$$

$$\left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{em}}^{20}}{R_{\text{mm}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ш}}^{20} \right\}$$

90,6052 МПа ≤ 639,9111 МПа , Умова міцності виконана

$$\Delta\sigma_M = \frac{Q_d + \frac{4 \cdot M}{D_{\text{сп}}} + F}{\pi \cdot (D + 2 \cdot c) \cdot (s_0 - c)} = \frac{5,613868 \cdot 10^5 + \frac{4 \cdot 0}{650} + 0}{3,141593 \cdot (600 + 2 \cdot 2) \cdot (12 - 2)} = 29,58526 \text{ МПа}$$

– у поперечному перерізі S0:

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma_M + f \cdot \Delta\sigma_1 = 29,58526 + 1,720223 \cdot 97,00477 = 75,40294 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - f \cdot \Delta\sigma_1 = 29,58526 - 1,720223 \cdot 26,63474 = -16,23242 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s_0 - c)} + 0,3 \cdot f \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{2 \cdot (12 - 2)} +$$

$$+ 0,3 \cdot 1,720223 \cdot 26,63474 = 64,83727 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{24} = \frac{p \cdot (D + 2 \cdot c)}{2 \cdot (s_0 - c)} - 0,3 \cdot f \cdot \Delta\sigma_1 = \frac{1,691787 \cdot (600 + 2 \cdot 2)}{2 \cdot (12 - 2)} -$$

$$- 0,3 \cdot 1,720223 \cdot 26,63474 = 37,34666 \text{ МПа}$$

В умовах праці:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})^2 + (\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})^2 - (\sigma_{21} + \Delta\sigma_{21})(\sigma_{23} + \Delta\sigma_{23})}}{\sqrt{(\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})^2 + (\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})^2 - (\sigma_{22} + \Delta\sigma_{22})(\sigma_{24} + \Delta\sigma_{24})}} \right\} \leq$$

$$\leq \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{ef}}^{20}}{R_{\text{mf}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right\}$$

$$\left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{em}}^{20}}{R_{\text{mm}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ш}}^{20} \right\}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TTP.00.00.00 ПЗ

Лист

95

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{109,1389 + 75,40294)^2 + (32,74167 + 64,83727)^2 - (-109,1389 + 75,40294)(32,74167 + 64,83727)}{(-109,1389 + (-16,23242)^2 + (-32,74167) + 37,34666)^2 - (-(-109,1389 + (-16,23242))(-32,74167 + 37,34666))} \right\} =$$

$$= 159,906 \text{ МПа}$$

$$\min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{еф}}^{20}}{R_{\text{мф}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ф}}^{20} \right\} = \min \left\{ \left(4,5 - 2,0 \frac{267}{516} \right) \cdot 184 \right\}$$

$$\left\{ \left(\left(4,5 - 2,0 \frac{R_{\text{еш}}^{20}}{R_{\text{мш}}^{20}} \right) [\sigma]_{\text{ш}}^{20} \right) \right\} = \min \left\{ \left(\left(4,5 - 2,0 \frac{267}{516} \right) \cdot 177,5 \right) \right\} = 615,0581 \text{ МПа}$$

159.906 МПа ≤ 615.0581 МПа, Стан міцності виконано.

Міцність обумовлена дотриманням.

Жорсткість фланця (с. 11 [12], [13]):

Допустимий кут повороту для зварних стикових фланців в умовах експлуатації:

$[\theta] = 0,009$ рад при $D \leq 2000$ мм Умова жорсткості фланця:

$\theta + \Delta\theta \leq [\theta] = 0,142823 + 0,05995862 = 0,2027816$ градус ≤ 0,515662 градус

Виконується умова жорсткості.

3.4 Розрахунок опори апарата

Розрахунок на міцність обіцянок від впливу опорних навантажень за PD 5500:2003, [11]

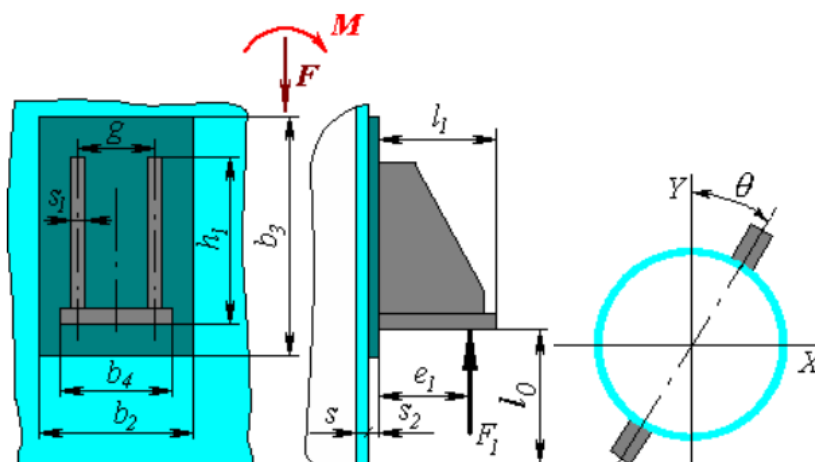


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема опори

Вихідні дані:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

XI.TGP.00.00.00 ПЗ

Лист

96

Елемент, пов'язаний із опорою: Кожух теплообмінника

Тип опори: Тип А

Внутрішній діаметр обичайки D : 600 мм

Товщина стінки обичайки, s : 6 мм

Добавка для компенсації корозії та ерозії, c_1 : 2 мм.

Сума додатків до розрахункової товщини стінки, c : 2 мм

Число опор: Дві

Відстань від краю елемента, l_0 : $1,5 \cdot 10^3$ мм

Ширина основної плити, b_4 : 150 мм

Висота опорної лапи, h_1 : 254 мм

Відстань між середніми лініями ребер, g : 126 мм

Товщина стінки лапи, s_1 : 4 мм

Довжина опорної лапи, l_1 : 148 мм

Відстань між точкою докладання зусилля та обидві чайкою або підкладним листом, e_1 : 123 мм

Кут розташування опор, θ : 0 градус

Ширина підкладного листа, b_2 : 200 мм

Довжина підкладного листа, b_3 : 330 мм

Товщина підкладного листа, s_2 : 6 мм

Коефіцієнт міцності зварного шва: $\varphi = 0,9$

Розрахунок у робочих умовах:

Умови навантаження:

Розрахункова температура, T : 70 °С

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p : 0,6395038 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M : 101,0738 Н·м

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

Розрахункове зовнішнє осьове зусилля, F: 0 Н

Результати розрахунку:

Таблиця 3.3 – Визначення розрахункових зусиль

Номер елемента, i	Назва елемента	Вага елемента G _i , Н
1	Днище еліптичне нижнє	559,248
2	Вихід циркуляційної рідини	31,65667
3	Вхід кислоти	9,717839
4	Фланцеве з'єднання №1	1,758825·10 ³
5	Розподільна камера	2,222486·10 ³
6	Вхід циркуляційної рідини	69,94544
7	Нижня теплообмінна секція	1,507582·10 ⁴
8	Вхід пари аміаку	109,1611
9	Середня теплообмінна секція	7,113989·10 ³
10	Вихід пари аміаку	109,1611
11	Верхня теплообмінна секція	3,888616·10 ⁴
12	Вхід води	51,18153
13	Днище еліптичне верхнє	553,6641
14	Штуцер введення води	51,18153

Включаючи вагу продукту за його наявності

Загальна вага посудини:

$$G = \sum G_i = 6,66022 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Дія моменту допускається лише у площині опорних лап.

Зусилля, що діє на опорну лапу:

$$F_1 = \frac{G + F}{2} + \frac{M}{D_k + 2 \cdot (e_1 + s + s_2)}, \quad (3.82)$$

$$F_1 = \frac{6,66022 \cdot 10^4 + 0}{2} + \frac{101,0738}{600 + 2 \cdot (123 + 6 + 6)} = 3,341728 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$K_2 = \begin{cases} 1,2 - \text{для робочих умов} \\ 1,0 - \text{для умов випробувань і монтажу} \end{cases}$$

Розрахунковий діаметр:

$$D_R = D = 600 \text{ мм}$$

Для опор типів А, В, С (при зміцненні підкладним листом для всіх типів):

$$\bar{\sigma}_m = \frac{p \cdot D_R}{2 \cdot (s - c)}, \quad (3.83)$$

$$\bar{\sigma}_m = \frac{0,6395038 \cdot 600}{2 \cdot (6 - 2)} = 47,96278 \text{ МПа}$$

$$\vartheta_2 = K_2 \cdot \frac{\sigma_m}{n_T \cdot [\sigma] \cdot \phi}, \quad (3.84)$$

$$\vartheta_2 = 1,2 \cdot \frac{47,96278}{1,5 \cdot 184 \cdot 0,9} = 0,2317043$$

$$\vartheta_1 = 0,4$$

Коефіцієнт K_1 :

$$K_1 = \left(\frac{1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}{3 \cdot \vartheta_1^2} \right) \cdot \left(\pm \sqrt{\frac{9 \cdot \vartheta_1^2 \cdot (1 - \vartheta_2^2)}{(1 + 3 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2)^2} + 1} - 1 \right); \quad (3.85)$$

$$K_1 \geq 0 = 0,9434931$$

Примітка: відповідно до п. 1.2.3 [11] при $\vartheta_2 < 0$ в розрахунку K_1 знаки ϑ_1 та ϑ_2 змінюють на протилежні.

Гранична напруга згину:

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99

$$[\sigma_i] = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2}, \quad (3.86)$$

$$[\sigma_i] = 0,9434931 \cdot 184 \cdot \frac{1,5}{1,2} = 217,0034 \text{ МПа}$$

$$x = \ln \left(\frac{D_R}{2 \cdot (s - c)} \right), \quad (3.87)$$

$$x = \ln \left(\frac{600}{2 \cdot (6 - 2)} \right) = 4,317488$$

$$y_1 = \ln \frac{b_3}{D_R}, \quad (3.88)$$

$$y_1 = \ln \frac{330}{600} = -0,597837$$

$$\ln v = (-49,919 - 39,119 \cdot x - 107,01 \cdot y_1 - 1,693 \cdot x^2 - 11,920 \cdot x \cdot y_1 - 39,276 \cdot y_1^2 + 0,237 \cdot x^3 + 1,608 \cdot x^2 \cdot y_1 + 2,761 \cdot x \cdot y_1^2 - 3,854 \cdot y_1^3) \cdot 10^{-2} = -1,634308$$

$$y = \ln \frac{h_1}{D_R}, \quad (3.89)$$

$$y = \ln \frac{254}{600} = -0,8595954$$

$$\ln z = (-5,964 - 11,395 \cdot x - 18,984 \cdot y - 2,413 \cdot x^2 - 7,286 \cdot x \cdot y - 2,042 \cdot y^2 + 0,1322 \cdot x^3 + 0,4833 \cdot x^2 \cdot y + 0,8469 \cdot x \cdot y^2 + 1,428 \cdot y^3) \cdot 10^{-2} = -0,5360137$$

Коефіцієнт K_8 :

$$K_8 = \min \{v, z\} = \min \{e^{-1,634308}, e^{-0,5360137}\}, \quad (3.90)$$

$$K_8 = \{0,1950874, 0,5850759\} = 0,1950874$$

Допустиме осьове зусилля в місці приварювання опорної лапи (при $b_2/b_3 = 0,6060606$):

$$[F_1] = \frac{[\sigma_i] \cdot b_3 \cdot (s - c)^2}{K_8 \cdot (e_1 + s_2)}, \quad (3.91)$$

$$[F_1] = \frac{217,0034 \cdot 330 \cdot (6 - 2)^2}{0,1950874 \cdot 123 + 6} = 4,552832 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100

Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи визначається виконанням умови:

$$F_1 \leq [F_1]$$

$$F_1 = 3,341728 \cdot 10^4 \text{ Н} \leq [F_1] = 4,552832 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Висновок: Умову міцності та стійкості виконано.

Розрахунок за умов випробувань (Гідровипробування)

Розрахунок проведений згідно з методикою наведеною вище.

Умови навантаження при випробуваннях:

Розрахункова температура, T : 20 °C

Розрахунковий внутрішній надлишковий тиск, p : 0,9395038 МПа

Розрахунковий згинальний момент, M : 101,0729 Н·м

Розрахункове зовнішнє осьове зусилля, F : 0 Н

Значення розрахункових зусиль використаємо з таблиці 3.3

Включаючи вагу продукту за його наявності

Загальна вага посудини:

$$G = \sum G_i = 6,66022 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Дія моменту допускається лише у площині опорних лап.

Зусилля, що діє на опорну лапу за формулою (3.82): $F_1 = 3,341728 \cdot 10^4 \text{ Н}$

$$K_2 = \begin{cases} 1,2 - \text{для робочих умов} \\ 1,0 - \text{для умов випробувань і монтажу} \end{cases}$$

Для опор типів А, В, С (при зміцненні підкладним листом для всіх типів) використаємо формули (3.83) та (3.84): $\bar{\sigma}_m = 70,46278 \text{ МПа}$, $\vartheta_2 = 0,2609733$, $\vartheta_1 = 0,4$

Коефіцієнт K_1 розрахуємо за формулою (3.85): $K_1 \geq 0 = 0,9123493$

Примітка: відповідно до п. 1.2.3 [11] при $\vartheta_2 < 0$ в розрахунку K_1 знаки ϑ_1 та ϑ_2 змінюють на протилежні.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

Граничну напругу згину визначимо за формулами (3.86 – 3.89):

$$[\sigma_i] = 273,7048 \text{ МПа}, \quad x = 4,317488, \quad y_1 = -0,597837, \quad \ln v = -1,634308, \\ y = -0,8595954, \quad \ln z = -0,5360137$$

Коефіцієнт K_8 розрахуємо за формулою (3.90): $K_8 = 0,1950874$

Допустиме осьове зусилля в місці приварювання опорної лапи (при $b_2/b_3 = 0,6060606$) визначаємо за формулою (3.91): $[F_1] = 5,742453 \cdot 10^4 \text{ Н}$

Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи визначається виконанням умови: $F_1 \leq [F_1]$, $F_1 = 3,341728 \cdot 10^4 \text{ Н} \leq [F_1] = 5,742453 \cdot 10^4 \text{ Н}$

Висновок: Умову міцності та стійкості виконано.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>102</i>

4 Монтаж та ремонт апарата

4.1 Монтаж розробленого апарата

Особливості компонування та монтажу проектованого обладнання (ремонт)

Технічним завданням передбачено блоково-модульне виконання установки виробництва РАД, що забезпечує можливість транспортування від ділових блоків автомобільним транспортом. Конструкція реактора трубчастого передбачає його монтаж у вертикальний виробничо-транспортний модуль (40-футовий стандартний) контейнер 2438×2591×12192 мм), який, при необхідності, може транспортуватися автотранспортом у горизонтальному положенні без демонтажу обладнання. Особливість процесів, що протікають в реакторі, зумовлює необхідність його монтажу у вертикальному положенні. Висота реактора 8,9 м. Ця конструктивна особливість запобігає необхідності монтажу реактора у вертикальному блоці, який може перевертатись у горизонтальне транспортне положення. В одному блоці з реактором може бути встановлено інше допоміжне обладнання: теплообмінник - холодильник готового продукту та сепаратор газовідділювач. Компоновка зазначеного обладнання в одному транспортному блоці дозволить скоротити довжину технологічних та допоміжних комунікацій, знизити вагу блокового модуля, спростити монтаж та підготовку до роботи.

Усі вузли та деталі, що входять до складу реактора трубчастого є типовими та не вимагають застосування спеціалізованих технологій виготовлення, випробування, обслуговування та ремонту.

4.2 Ремонт апарата

Під час ремонту реактора залежно від технічного стану та потреб ремонту можуть бути використані різні матеріали для заміни пошкоджених деталей. При виборі матеріалів для ремонту важливо враховувати хімічний склад та механічні властивості матеріалів, щоб забезпечити безперебійну та ефективну роботу реактора в майбутньому.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>103</i>

Послідовність ремонту реактора рідких азотних добрив може включати наступні етапи:

Перевірка технічного стану реактора. Проводиться візуальний огляд та оцінка механічних властивостей реактора. Визначається рівень зносу та визначаються роботи, які потрібно виконати.

Перш за все, реактор необхідно очистити від залишків продуктів та видалити з нього всі деталі, які заважають визначити стан реактора. Після цього проводиться візуальна оцінка та огляд реактора з метою виявлення механічних пошкоджень, відкритих тріщин, знебарвлення, забруднень та інших ознак зносу. Якщо виявлено будь-які пошкодження, їх потрібно виправити наступними етапами ремонту.

Підготовка реактора до ремонту. Підготовка місця роботи, демонтаж та очищення зношених деталей.

Для підготовки реактора до ремонту потрібно видалити всі зношені деталі, які підлягають заміні. За допомогою спеціального обладнання необхідно зняти та очистити кришку реактора, щоб виконати інші роботи, такі як заміна зношених деталей, відновлення технологічних отворів та зварювання.

Заміна зношених деталей. Найбільш зношені деталі повинні бути замінені на нові, більш міцні та ефективні.

На цьому етапі проводиться заміна зношених деталей на нові. Це можуть бути елементи, такі як затискні кільця, манжети, змінні штуцери, запобіжники, що працюють зі штовхачами та інші деталі, які можуть зноситись під час роботи реактора.

Після заміни зношених деталей та проведення робіт з відновлення технологічних отворів та зварювання, реактор збирається знову. Кожна деталь повинна бути належно змонтована та закріплена. Після збірки проводиться контроль за розміщенням деталей та їх фіксацією.

Відновлення технологічних отворів та зварювання. При необхідності відновлюються технологічні отвори в реакторі, які були пошкоджені. Також, проводиться зварювання пошкоджених ділянок реактора.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>104</i>

За допомогою спеціального обладнання, яке використовується для відновлення технологічних отворів та зварювання, виконуються необхідні роботи. При необхідності проводиться зварювання деталей, що зламалися або були зіпсовані. Важливо, щоб зварювання було виконане професійними зварниками, оскільки неправильно зварені деталі можуть призвести до подальшого руйнування реактора.

Очищення та поверхнева обробка. Після виконання ремонтних робіт, реактор повинен бути детально очищений та оброблений, щоб усунути залишки забруднень та покращити його естетичний вигляд.

Перевірка роботи реактора. Після завершення ремонтних робіт, проводиться перевірка роботи реактора з метою переконатися, що всі деталі працюють належним чином та реактор готовий до повторної експлуатації.

Після завершення ремонту реактора, він повинен бути підданий ряду випробувань, щоб переконатися у його надійності та правильному функціонуванні. До таких випробувань можуть входити: випробування на герметичність, на міцність та стійкість до тиску, на відповідність вимогам технічного завдання та інші. Важливо, щоб всі випробування були проведені відповідно до вимог технічної документації та за участю фахівців з належною кваліфікацією.

Після завершення всіх робіт з ремонту, проводяться випробування для перевірки роботи реактора. Зазвичай ці випробування включають в себе наступні кроки:

1. Визначення тиску в реакторі - перевірка наявності тисків, що відповідають нормальній роботі реактора. Для цього встановлюються датчики тиску, які моніторять тиск в реакторі протягом певного часу.

2. Визначення температури в реакторі - перевірка відповідності температур, які відповідають нормальній роботі реактора. Для цього встановлюються термодатчики, які моніторять температуру в реакторі протягом певного часу.

3. Перевірка наявності витоків - виявлення будь-яких витоків, які можуть призвести до аварійної ситуації. Для цього роблять перевірку всіх з'єднань і місць,

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>105</i>

де можуть виникати витоки. Також можуть застосовуватись методи випробувань на герметичність, наприклад, метод високого тиску.

4. Перевірка рівня реагентів - перевірка рівня реагентів у реакторі. Для цього можуть використовуватись різноманітні датчики рівня, наприклад, ультразвукові датчики.

5. Перевірка тиску в системі живлення реагентів - перевірка тиску в системі живлення реагентів, щоб переконатись в тому, що реагенти нормально подаються в реактор. Для цього встановлюються датчики тиску на системі живлення реагентів.

6. Перевірка ефективності реактора - проводиться з метою переконатися в тому, що реактор працює на повну потужність та виконує свої функції - перевірка наявності нормального тиску у системі живлення, яка забезпечує передачу реагентів до реактора.

7. Випробування на міцність - перевірка міцності реактора та його частин після ремонту. Це може включати в себе різноманітні випробування, такі як гідростатичне випробування, випробування на згин, випробування на удар та інші.

8. Випробування на протікання - перевірка наявності будь-яких витоків у системі та їх усунення.

9. Перевірка регулювання - перевірка роботи регулюючих систем реактора, таких як клапани, датчики тиску, температури та інші.

10. Перевірка автоматичних систем - перевірка роботи автоматичних систем безпеки, таких як системи аварійного відключення, системи пожежогасіння, системи вентиляції та інші.

Після завершення всіх етапів ремонту та випробувань, реактор може бути відновлений до експлуатації та використовуватись для виробництва рідких азотних добрив. Важливо, щоб ремонт реактора проводився відповідно до вимог стандартів. Для зварювання використовуються високоякісні електроди, а також спеціальні методи, щоб забезпечити максимальну міцність та надійність зварювальних швів.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>106</i>

Важливою частиною ремонту реактора є профілактичні роботи, які повинні виконуватись регулярно для підтримання технічного стану та запобігання можливим пошкодженням у майбутньому.

					<i>XI. ТГР.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>107</i>

5 Охорона праці [12]

Ураження електричним струмом людини може мати серйозні наслідки, включаючи травми, порушення ритму серця, опіки і навіть смерть. Основні фактори, які визначають наслідки ураження електричним струмом, включають [14]:

- Величина струму та час його дії на організм людини. Чим більший струм та довше він діє на організм, тим більші наслідки можуть бути.
- Шлях, яким протікає струм через організм. Залежно від того, через які органи протікає струм, можуть бути різні наслідки.
- Відповідь організму на ураження електричним струмом. Це може бути спричинене індивідуальними фізіологічними особливостями організму.

Існують різні види уражень електричним струмом, включаючи:

- Дострокові ураження, коли струм протікає через зовнішні частини тіла людини, наприклад, шкіру.
- Короткочасні ураження, коли струм протікає через внутрішні органи та м'язи людини.
- Довготривалі ураження, коли струм протікає через органи та тканини на довгому проміжку часу.

До факторів, залежних від характеристик струму, належать час тривалості впливу струму, сила струму, напруга та частота. Згідно з науковими дослідженнями, найбільш шкідливою є дія струму високої напруги (понад 1000 В), оскільки вона може спричинити непоправні наслідки, включаючи смерть [15]. Відповідно до властивостей організму людини, фактори, що визначають наслідки ураження електричним струмом, включають індивідуальну чутливість до струму, шлях проходження струму через організм та наявність супутніх захворювань. Наприклад, люди зі зниженою чутливістю до струму можуть не відчувати болю при ураженні струмом, тому їхні наслідки можуть бути більш серйозними.[13]

Існують також різні види уражень електричним струмом, такі як контактне та блискавичне ураження. Контактне ураження виникає тоді, коли струм протікає через

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		108

організм через контакт з електричним проводом, а блискавичне ураження відбувається при прямому ударі блискавки. У обох випадках наслідки можуть бути дуже серйозними, і в разі ураження електричним струмом необхідно негайно звернутися до лікаря.[14]

Згідно зі статистикою, зареєстровано більше 10 тисяч випадків ураження електричним струмом на робочому місці в США тільки в 2020 році (за даними Occupational Safety and Health Administration - OSHA) [16]. У той же час, більшість таких випадків можна уникнути за допомогою відповідних заходів профілактики та безпеки праці.

Один з найважливіших кроків для запобігання ураження електричним струмом - це встановлення системи заземлення, що зменшує ризик виникнення статичної електрики та забезпечує безпечний шлях для електричного струму [17]. Також, працівникам, які повинні працювати з електроустаткуванням, необхідно забезпечити належну інструктаж та навчання з питань безпеки роботи з електричними пристроями та системами.

Окрім цього, дотримання правил експлуатації та регулярна перевірка техніки та обладнання може допомогти запобігти небезпеці ураження електричним струмом на підприємстві. Також, необхідно забезпечити наявність відповідної захисної електрообладнання, такого як захисні каски, рукавиці, боти та інші засоби захисту від електричного струму [18].

У випадку, якщо на підприємстві виникають проблеми з електропостачанням або технічні несправності в електроустаткуванні, працівники повинні негайно повідомляти про це відповідних фахівців та припинити роботу з таким обладнанням до його ремонту чи заміни. Надто часте включення та вимикання електричного обладнання може призвести до перегріву та зносу контактів, що збільшує ризик ураження електричним струмом.

Отже, дотримання відповідних правил та заходів безпеки на робочому місці може запобігти ураженню електричним струмом та зберегти здоров'я та життя працівників.

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>109</i>

Список літератури

1. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. 216с
2. Андреев Е.И. Расчёт тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – Л. Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 192с., ил.
3. Кононов А.В. и др. Основные технологии комплексных удобрений/ А.В.Кононов, В.Н.Стерлин, Л.И.Евдокимова. – М.: Химия, 1988. – 320 с.:ил.
4. Ляпков А.А., Иванов Г.Н., Бочкарёв В. В. Расчёты реакционной аппаратуры химических производств. - Томск: Изд-во ТПУ – 2002. – 122 с.
5. Михаил Р., Кырлогану К. Реакторы химической промышленности. – Л. «Химия», Ленинградское отделение, 1967. – 388 с.
6. Вейлас С. Химическая кинетика и расчёты промышленных реакторов. – М. «Химия», 1964. – 432с.
7. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 5-е
8. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд.20-е, перераб. и доп. М., «Химия», 1976.
9. Технология связанного азота / В.И.Атрощенко, А.М.Алексеев, А.П.Засорин и др.; Под. ред. акад. АН УССР В.И.Атрощенко. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 327с
10. EN 13445. Unfired pressure vessels.
11. PD 5500:2003. Specification for unfired fusion welded pressure vessels.
12. Керівництво з охорони праці для електротехнічних підприємств. - К.: Центральний інститут підготовки кадрів охорони праці, 2007. - 320 с.
13. Клопотун В.В., Галушко Ю.М., Строков С.І. та ін. "Медико-біологічні аспекти електротравматизму". Ліки України. 2010. № 11(156). С. 39-41.
14. Матюхін В.І., Дудоров О.В. "Вплив електричного струму на організм людини". Медичні перспективи. 2017. Т. 22, № 4. С. 46-52.
15. Макуха Ю.О., Коваленко А.І., Єгорова Н.О. та ін. "Особливості клініки, діагностики та лікування ураження електричним струмом". Міжнародний неврологічний журнал. 2019. Т. 11, № 6. С. 73-77.

					<i>XI.TTP.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		110

16. Occupational Safety and Health Administration. (2021). Electrical safety. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.osha.gov/electrical-safety> [Дата доступу: 20 квітня 2023 р.]

17. National Safety Council. (2021). Electrical Safety. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.nsc.org/home-safety/safety-topics/electrical-safety> [Дата доступу: 20 квітня 2023 р.]

18. Ministry of Labour, Training and Skills Development. (2022). Electrical Hazards in the Workplace. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.ontario.ca/document/electrical-safety-workplace/electrical-hazards-workplace> [Дата доступу: 20 квітня 2023 р.]

19. Методичні вказівки до виконання курсового проекту (роботи) з дисципліни "Розрахунок і конструювання машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв"/ Укладачі: В.А. Смірнов, В.Я. Стороженко. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 120 с.

20. Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Математичне моделювання та оптимізація об'єктів хімічної технології» з підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» у галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія» з спеціальності 161 «Хімічна технологія та інженерія» спеціалізації «радіаційний та хімічний захист».

					<i>XI.TGP.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>111</i>