

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Факультет інженерії**  
**Кафедра машинобудування та прикладної механіки**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до випускної кваліфікаційної роботи бакалавра

**на тему:**

.....

.....

**Студента** ..... **IV** ..... **курсу** ..... **групи** **ГМ-17ДБ** .....

**спеціальності:** ..... **133 Галузеве машинобудування** .....

.....

Литвінов В.І.

(прізвище та ініціали)

.....  
(підпис)

**Керівник роботи** ..... **старш. викл. Табунціков В.Г.** .....

(вчене звання, науковий ступінь,  
прізвище та ініціали)

.....  
(підпис)

**Завідувач кафедри** ..... **проф., д.т.н. Соколов В.І.** .....

(вчене звання, науковий ступінь,  
прізвище та ініціали)

.....  
(підпис)

Сєверодонецьк – 2021

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет    Інженерії

Кафедра        машинобудування та прикладної механіки

Освітньо-кваліфікаційний рівень    Бакалавр

Спеціальність                    133 «Галузеве машинобудування»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**д.т.н., проф. Соколов В.І.**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 року

**ЗАВДАННЯ  
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА  
студенту**

Литвінов Владіслав Іванович  
*(прізвище, ім'я, по батькові)*

1. Тема роботи

керівник роботи

Старший викладач Табунціков Володимир Георгійович

*(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)*

затверджені наказом по університету

від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 року \_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи

3. Вихідні дані роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Реферат. Вступ. Аналітичний огляд. Опис технологічної схеми та конструкції колони, теплообмінника. Конструкційні матеріали для виготовлення теплообмінника. Визначення основних розмірів теплообмінника. Розрахунки на міцність елементів теплообмінника. Технологія виготовлення теплообмінника. Ремонт теплообмінника. Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників):

1. Кінематична схема верстату. 2. Вал коробки швидкостей. 3. Кресленик заготовки деталі «Вал». 4. Маршрутний технологічний процес. 5. Наладка інструментальна.

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврсь-  
кої роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

1. Аналітичний огляд	5
2. Опис технологічної схеми та конструкції колони, теплообмінника	14
3. Конструкційні матеріали для виготовлення теплообмінника	21
4. Визначення основних розмірів теплообмінника	23
5. Розрахунки на міцність елементів теплообмінника	26
5.1 Початкові дані	26
5.2 Розрахункова температура	26
5.3 Допустимі напруження	30
5.4 Коефіцієнти міцності зварних швів	31
5.5 Додавки до розрахункових величин	32
5.6 Розрахунок кожуха теплообмінника	33
5.6.1 Визначення допоміжних величин	34
5.6.2 Визначення зусиль в елементах апарата	39
5.6.3 Визначення напружин в елементах апарата	42
5.6.4 Розрахунок трубних решіток на міцність і жорсткість	45
5.6.5 Визначення допоміжних величин	46
5.6.6 Розрахунок труб на міцність та стійкість	46
5.6.7 Розрахунок кріплення труб в трубній решітці	47
6. Технологія виготовлення	48
7. Ремонт и монтаж	65
ЛІТЕРАТУРА	83

## **1. Аналітичний огляд**

### **Ректифікація**

Ректифікація – один зі способів поділу рідких сумішей заснований на різному розподілі компонентів суміші між рідкою й паровий фазами. У якості апаратів, які служать для проведення ректифікації використовуються ректифікаційні колони, що складаються із власне колони, де здійснюється протитечійне контактування пари й рідини, і пристроїв, у яких відбувається випар рідини й конденсація пари – куба й дефлегматора. Колона являє собою вертикально вартий порожній циліндр, усередині якого встановлені так звані тарілки (контактні пристрої різної конструкції) або поміщений фігурний грудковий матеріал – насадка. Куб і дефлегматор – це звичайно кожухотрубні теплообмінники (знаходять застосування також трубчасті печі й куби- випарники).

Призначення тарілок і насадки – поділ міжфазної поверхні й поліпшення контакту між рідиною й паром. Тарілки, як правило, забезпечуються пристроєм для переливу рідини. У якості насадки ректифікаційних колон звичайно використовуються кільця, діаметр яких рівний їхній висоті.

Як у насадкових, так і в тарілчастих колонах кінетична енергія пари використовується для подолання гідравлічного опору контактних пристроїв і для створення динамічної дисперсної системи пара – рідина з великою міжфазною поверхнею. Існують також ректифікаційні колони з підведенням механічної енергії, у яких дисперсна система створюється при обертанні ротора, встановленого по осі колони. Роторні апарати мають менший перепад тиску по висоті, що особливо важливо для вакуумних колон.

По способу проведення розрізняють - безперервну й періодичну ректифікацію. У першому випадку поділювана суміш безупинно подається в ректифікаційну колону, а з колони безупинно приділяються дві або більш число фракцій, збагачених одними компонентами й збіднених

іншими.

Повна колона складається із двох секцій зміцнювальної й вичерпної. Вихідна суміш (звичайно при температурі кипіння) подається в колону, де змішується з так званою витягнутою рідиною, що стікає по контактних пристроях (тарілках або насадці) вичерпної секції протитечією до потоку, що піднімається, пари. Досягаючи низу колони, рідина збагачується важколетучими компонентами. Унизу рідина частково випаровується в результаті нагрівання теплоносієм, що підводить, і пара знову надходить у вичерпну секцію. Пройшовши її, збагачений легколетучими компонентами, пара надходить у дефлегматор, де звичайно повністю конденсується підходящим холодоагентом.

Отримана рідина ділиться на два потоки - дистилят і флегму. Дистилят є продуктивним потоком, а флегма надходить на зрошення зміцнювальної секції, по контактних пристроях якої стікає. Частина рідини виводиться з куба колони у вигляді так званого кубового залишку (також продуктивний потік).

Якщо вихідну суміш потрібно розділити безперервним способом на число фракцій більше двох, то застосовується послідовне або паралельно - послідовне з'єднання колон.

При періодичній ректифікації вихідна рідка суміш одноразово завантажується в куб колони, ємність якої відповідає бажаній продуктивності. Пари надходять у колону й піднімаються до дефлегматора, де відбувається їхня конденсація. У початковий період увесь конденсат вертається в колону, що відповідає режиму повного зрошення. Потім конденсат ділиться на дистилят і флегму. У міру відбору дистиляту (або при постійному флегмовому числі, або з його зміною з колони виводяться спочатку легколетучі компоненти, потім середнелетучі і так далі). Потрібну фракцію (або фракції) відбирають у відповідний збірник. Операція триває до повної переробки спочатку завантаженої суміші.

Основні області промислового застосування ректифікації – одер-

жання окремих фракцій і індивідуальних вуглеводнів з нафтової сировини в нафтопереробній і нафтохімічній промисловості, окисі етилену, акрілонітрила, акрілхлорсиланов— у хімічній промисловості. Ректифікація широко використовується й в інших галузях народного господарства: коксохімічної, лісохімічної, харчової, хіміко-фармацевтичної промисловостях.

### **Конструкції теплообмінників і обґрунтування вибору теплообмінника**

Види теплообмінників

Апарати теплообмінні

Вони досить прості у виготовленні, відрізняються можливістю розвивати велику поверхню теплообміну в одному апараті, надійні в роботі.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з нерухомими трубними решітками та з поперечними перегородками в міжтрубному просторі, що застосовуються в хімічній, нафтовій та інших галузях промисловості, позначаються індексами і класифікуються:

- за призначенням (перша буква індексу): Т - теплообмінники; Х - холодильники; К - конденсатори; І - випарники;
- по конструкції (друга буква індексу) - Н - з нерухомими трубними решітками; К - з температурним компенсатором на кожусі; П - з плаваючою головкою; У - з U-подібними трубами; ПК - з плаваючою головкою і компенсатором на ній;
- по розташуванню (третя буква індексу): Г - горизонтальні; В - вертикальні.

*Теплообмінники з нерухомими трубними решітками.*

Теплообмінники призначені для нагріву та охолодження, а холодильники - для охолодження (водою або іншим нетоксичним, непожаро- і невибухонебезпечним хладоагентом) рідких і газоподібних середовищ.

Теплообмінники і холодильники можуть встановлюватися горизонтально або вертикально, бути одно-, дво-, чотири- і шестіходовими по трубному простору. Труби, кожух і інші елементи конструкції можуть бути виготовлені з

вуглецевої або нержавіючої сталі, а труби холодильників - також і з латуні. Розподільні камери і кришки холодильників виконують з вугле-родістої сталі. Схема теплообмінника з нерухомими трубними решітками приведена на рис. 3.1. У кожусі 1 розміщений трубний пучок, теплообмінні труби 2 якого развальцовани в трубних решітках 3.

Трубна решітка жорстко з'єднана з кожухом. З торців кожух апарату закритий розподільними камерами 4 і 5, Кожух і камери з'єднані фланцями.

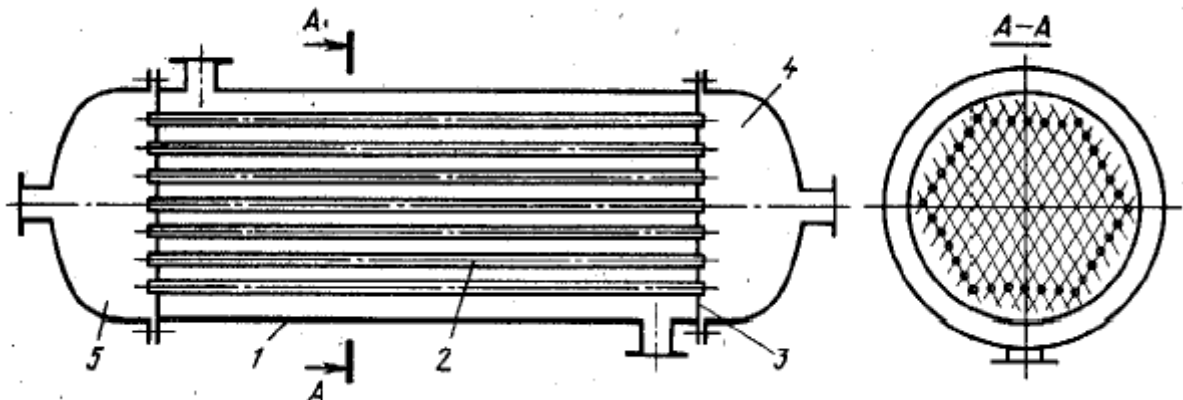


Рис. 3.1. Теплообмінник з нерухомою трубної ґратами

Для підведення і відведення робочого середовища (теплоносіїв) апарат забезпечений штуцерами. Один з теплоносіїв в цих апаратах рухається по трубах, інший - в міжтрубному просторі, обмеженому кожухом і зовнішньою поверхнею труб.

Особливістю апаратів типу Н є те, що труби жорстко з'єднані з трубними решітками, а решітки приварені до кожуха. У зв'язку з цим виключена можливість взаємних переміщень труб і кожуха; тому апарати цього типу називають ще теплообмінниками жорсткої конструкції.

Труби в кожухотрубних теплообмінниках намагаються розмістити так, щоб зазор між внутрішньою стінкою кожуха і поверхнею, що обгинає пучок труб, був мінімальним; в іншому випадку значна частина теплоносія може минути основну поверхню теплообміну. Для зменшення кількості теплоносія, що проходить між трубним пучком і кожухом, в цьому просторі встановлюють



спеціальні наповнювачі, наприклад приварені до кожуха поздовжні смуги або глухі труби, які не проходять через трубні решітки та можуть бути розташовані безпосередньо біля внутрішньої поверхні кожуха.

Якщо площа перерізу трубного простору (число і діаметр труб) обрана, то в результаті теплового розрахунку визначають коефіцієнт теплопередачі і теплообмінну поверхню, по якій розраховують довжину трубного пучка. Остання може виявитися більше довжини серійно випускаються труб. У зв'язку з цим застосовують багатоходові (по трубному простору) апарати з поздовжніми перегородками в розподільній камері. Промисловістю випускаються двох-, чотирьох- і шестіходові теплообмінники жорсткої конструкції.

*Таблиця. 3.1*

Параметри кожухотрубчасті теплообмінників і холодильників

D кожуха, мм	d труб, мм	Число ходов	Общее число труб, шт	Поверхность теплообмена (в м ) при длине труб, м							Площадь сеч потока 100м <sup>2</sup>		Площадь сече ния одного хода по трубам 100 м <sup>2</sup>
				1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	9.0	в выре- зе пе- регоро- док	между пере- городками	
159	20*2	1	19	1,0	2,0	2,5	3,5	-	-	-	0,3	0,5	0,4
	25*2	1	13	1,0	1,5	2,0	3,0	-	-	-	0,4	0,8	0,5
273	20*2	1	61	4,0	6,0	7,5	11,5	-	-	-	0,7	1,0	1,2
	25*2	1	37	3,0	4,5	6,5	9,0	-	-	-	0,9	1,1	1,3
325	20*2	1	100	-	9,5	12,5	19,0	25,0	-	-	1,1	2,0	2,0
		2	90	-	8,5	11,0	17,0	22,5	-	-	1,1	1,6	0,9
	25*2	1	62	-	7,5	10,0	14,5	19,5	-	-	1,3	2,9	2,1
		2	56	-	6,5	9,0	13,0	17,5	-	-	1,3	1,5	1,0
400	20*2	1	181	-	-	23,0	34,0	46,0	68,0	-	1,7	2,5	3,6
		2	166	-	-	21,0	31,0	42,0	63,0	-	1,7	3,0	1,7
	25*2	1	111	-	-	17,0	26,0	35,0	52,0	-	2,0	3,1	3,8
		2	100	-	-	16,0	24,0	31,0	47,0	-	2,0	2,5	1,7
600	20*2	1	389	-	-	49	73	98	147	-	4,1	6,6	7,8
		2	370	-	-	47	70	93	139	-	4,1	4,8	3,7
		4	334	-	-	42	63	84	126	-	4,1	4,8	1,6
		6	316	-	-	40	60	79	119	-	3,7	4,8	0,9
	25*2	1	257	-	-	40	61	81	121	-	4,0	5,3	8,9
		2	240	-	-	38	57	75	113	-	4,0	4,5	4,2
		4	206	-	-	32	49	65	97	-	4,0	4,5	1,8
		6	196	-	-	31	46	61	91	91	3,7	4,5	1,1
	20*2	1	717	-	-	90	135	180	270	405	6,9	9,1	14,1
		2	690	-	-	87	130	173	260	390	6,9	7,0	6,9
800		4	638	-	-	80	120	160	240	361	6,9	7,0	3,0
		6	618	-	-	78	116	155	233	349	6,5	7,0	2,0
	25*2	1	465	-	-	73	109	146	219	329	7,0	7,9	16,1
		2	442	-	-	69	104	139	208	312	7,0	7,0	7,7
		4	404	-	-	63	95	127	190	285	7,0	7,0	3,0
		6	384	-	-	60	90	121	181	271	6,5	7,0	2,2
	20*2	1	1173	-	-	-	221	295	442	663	10,1	15,6	23,6
		2	1138	-	-	-	214	286	429	643	10,1	14,6	11,4
		4	1072	-	-	-	202	269	404	606	10,1	14,6	5,1
		6	1044	-	-	-	197	262	393	590	9,6	14,6	3,4
1000	25*2	1	747	-	-	-	176	235	352	528	10,6	14,3	25,9
		2	718	-	-	-	169	226	338	507	10,6	13,0	12,4
		4	666	-	-	-	157	209	314	471	10,6	13,0	5,5
		6	642	-	-	-	151	202	302	454	10,2	13,0	3,6
	20*2	1	1701	-	-	-	-	427	641	961	14,5	18,7	34,2
		2	1658	-	-	-	-	417	625	937	14,5	17,6	16,5
		4	1580	-	-	-	-	397	595	893	14,5	17,6	7,9
		6	1544	-	-	-	-	388	582	873	13,1	17,6	4,9
	25*2	1	1083	-	-	-	-	340	510	765	16,4	17,9	37,6
		2	1048	-	-	-	-	329	494	740	16,4	16,5	17,9
1200		4	986	-	-	-	-	310	464	697	16,4	16,5	8,4
		6	958	-	-	-	-	301	451	677	14,2	16,5	5,2

Двохходовий горизонтальний теплообмінник типу Н (рис. 3.2) складається з циліндричного зварного кожуха 8, розподільної камери 11 і двох кришок 4. Трубний пучок утворений трубами 7, закріпленими в двох трубних решітках 3.

Трубні решітки приварені до кожуха. Кришки, розподільна камера і кожух з'єднані фланцями. У кожусі і розподільній камері виконані штуцера для введення і виведення теплоносіїв з трубного (штуцера 1, 12) і міжтрубного (штуцера 2, 10) просторів. Перегородка 13 в розподільній камері утворює ходи теплоносія по трубах. Для герметизації вузла з'єднання поздовжньої перегородки з трубної ґратами використана прокладка 14, укладена в паз решітки 3.

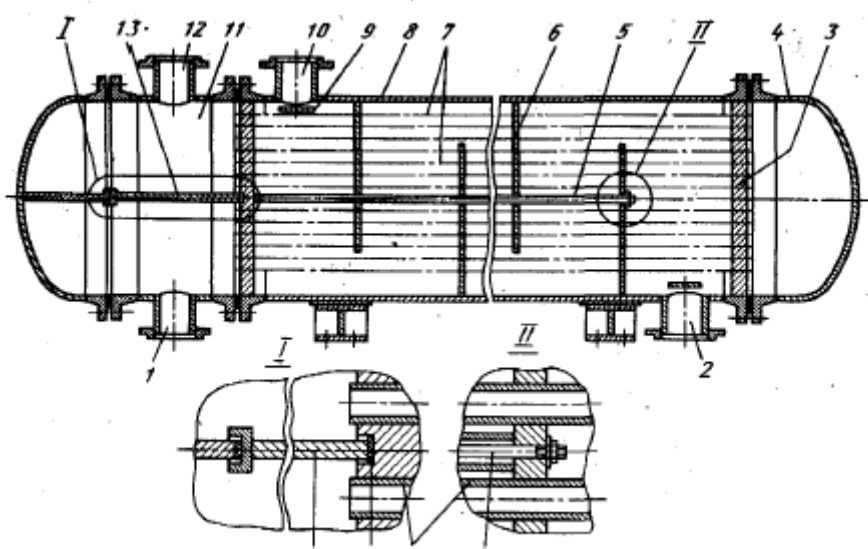


Рис. 3.2. Двохходовий горизонтальний теплообмінник з нерухомими ґратами

Оскільки інтенсивність тепловіддачі при поперечному обтіканні труб теплоносієм вище, ніж при поздовжньому, в міжтрубному просторі теплообмінника встановлені зафіксовані стяжками 5 поперечні перегородки 6, що забезпечують зигзагообразное по довжині апарату рух теплоносія в міжтрубному просторі. На вході теплообмінного середовища в міжтрубний простір передбачений відбійник 9 - кругла або прямокутна пластина, що оберігає труби від місцевого ерозійного зношування.

Поверхня теплопередачі нормалізованих теплообмінників і холодильників, наведені в табл. 3.1.

Кожухотрубчасті конденсатори призначені для конденсації пари в міжтрубному просторі, а також для підігріву рідин і газів за рахунок теплоти

конденсації пари. Вони можуть бути з нерухомою трубної ґратами або з температурним компенсатором на кожусі, вертикальні або горизонтальні.

Відповідно до ГОСТ 15121-79, конденсатори можуть бути двох-, чотирьох- і шестіходовими по трубному простору. Від холодильників вони відрізняються великим діаметром штуцера для підведення пари в міжтрубний простір.

Для відведення конденсату і запобігання проскакування пара в лінію відводу конденсату теплообмінні апарати, що обігріваються насиченою водяною парою, повинні забезпечуватися конденсатовідвідниками.

При виборі типу теплообмінника можна керуватися наступним рекомендаціями.

1. При обміні теплотою двох рідин або двох газів доцільно вибрати секційні (елементні) теплообмінники; якщо через великий поверхні теплообмінника конструкція виходить громіздкою, можна прийняти до установки багатоходової кожухотрубчасті теплообмінник.

2. При підігріві рідини парою рекомендуються багатоходові у трубному просторі кожухотрубчасті апарати з подачею пара в міжтрубний простір.

3. Для хімічно агресивних середовищ і при невеликих теплових продуктивності економічно доцільні сорочкові, зрошувальні і заглибні теплообмінники.

4. Якщо умови теплообміну по обидві сторони тепло-передавальної поверхні різко різні (газ і рідина), повинні бути рекомендовані трубчасті ребристі теплообмінники.

5. Для пересувних і транспортних теплових установок, авіаційних двигунів і кріогенних систем, де при високій ефективності процесу необхідні компактність і мала маса, знаходять широке застосування пластинчасті ребристі теплообмінники.

6. У всіх випадках необхідно прагнути вибирати найбільш прості за конструкцією і найбільш дешеві за матеріалами теплообмінники. До ускладне-

ним апаратів (з плаваючою камерою, з сильфонним компенсатором, спіральним), а також з латунними або мідними трубами слід вдаватися лише в разі обґрунтованої необхідності.

Виходячи з усього перерахованого для даних умов був обраний кожухотрубчасті підігрівач з нерухомими трубними решітками.

## **2. Опис конструкції та принципу дії апарату**

Опис і обґрунтування технологічної схеми ректифікації установки

В даному курсовому проекті розглянута схема безперервної ректифікації. Безперервний процес характеризується безперервною подачею сировини в колону і безперервною вивантаженням продуктів поділу. При цьому всі стадії процесу (ректифікація, підігрів сировини, дистиляція і інші) розділені в просторі і проводяться одночасно в різних апаратах. Великотоннажні виробництва в основному використовують безперервну ректифікацію тому вона, як і всі безперервні процеси має ряд переваг перед періодичної:

- компактність установки;
- можливість використання обладнання великої потужності;
- однорідність за якістю продукції;
- стабільні умови роботи, що полегшує встановлення необхідного режиму роботи і автоматизацію процесу;
- працю обслуговуючого персоналу легше, безпечніше, продуктивніше (тому що відсутні простої устаткування між операціями);
- зменшений витрата тепла, причому можливе використання тепла кубового залишку на підігрів вихідної суміші в теплообміннику.

Однак поряд з істотними перевагами безперервна ректифікація має ряд недоліків в порівнянні з періодичною. Основними недоліками є підвищена вартість основних виробничих фондів і необхідність використання більш кваліфікованих фахівців.

Таким чином в виробництвах великого масштабу більш доцільно застосовувати безперервну ректифікацію, а в невеликих нерівномірно працюючих виробництвах - періодичну.

При виборі схеми установки виходять, перш за все, з економіч-ської ефективності пропонованих заходів. При цьому так само враховувати-ються технологічні особливості того чи іншого виробництва. Таким чином все робиться для того, щоб з найменшими витратами досягти максимальної ефективності. Так при підборі обладнання головними показниками є:

- а) вартість;
- б) простота монтажу;
- в) простота експлуатації.

Опис безперервно діючої ректифікаційної установки

Спрощена схема безперервно діючої ректифікаційної установки зображена на рис 1.1.

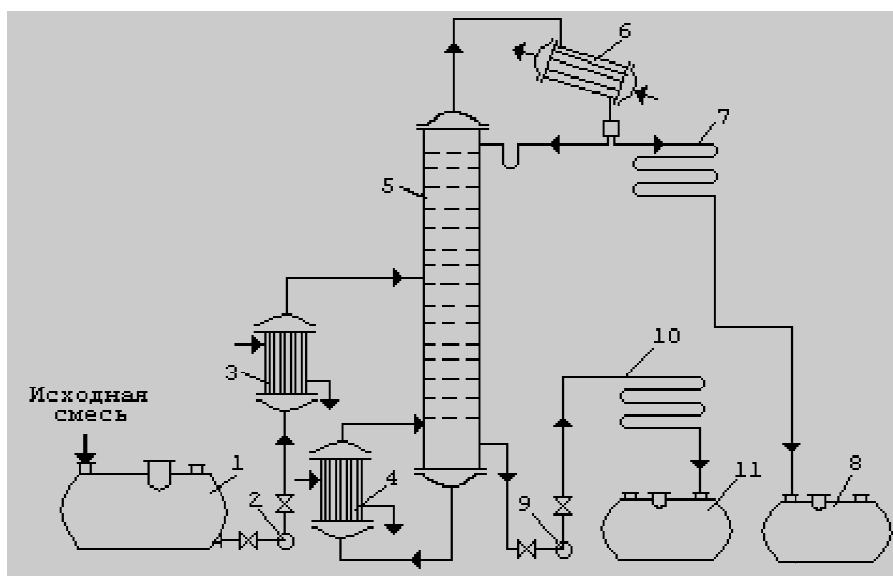


Рис 1.1 Схема безперервно діючої ректифікаційної установки

1 - ємність з вихідної сумішшю; 2,9 - насоси; 3 - підігрівач;  
 4 - кип'ятильник; 5 - колона ректифікації; 6 - дефлегматор; 7-  
 холодильник-дистиллятор; 8 - збірник дистилляту; 10-холодильник кубового  
 залишку; 11 - збірник кубового залишку;

Вихідна суміш з подається насосом 2 з ємності 1 подається в підігрівач 3, де нагрівається від початкової температури до температури кипіння. Потім надходить в колону ректифікації 5 на живильну тарілку, де змішується з флегмою. Рідка суміш стікає в нижню ис-вичерпується частина колони, взаємодіючи при цьому на тарілках з піднімається з кип'ятильника 4 паром. Парова фаза піднімаючись від тарілки до тарілки збагачується низькокиплящим компонентом і через штуцер вгорі колони надходить і конденсується

в дефлегматоре 6, який охолоджується зворотною водою. Частина отриманого конденсату повертається на верхню тарілку в колону у вигляді флегми для зрошення нижньої частини, а інша частина відбирається у вигляді дистиляту, який використовується як готовий продукт, що містить переважно легколетучий компонент. Перед відведенням готових продуктів в збірники 8 і 11, вони попередньо охолоджуються в холодильниках 7 і 10. В результаті роботи колони їх вихідної суміші отримують 2 готових продукту кубовий залишок етанол і дистилят ацетон.

Зі збільшенням обсягу промислового виробництва, прискоренням темпів науково-технічного прогресу особливо гостро постає проблема захисту навколишнього середовища від забруднення шкідливими речовинами. Забруднення атмосфери і водойм порушує екологію і завдає величезної шкоди народному господарству. До найбільш великих джерел забруднення атмосфери і водойм відносяться, зокрема, технологічні лінії і агрегати підприємств хімічної і нафтохімічної промисловості. Значна частина технологічних процесів супроводжується виділенням пилу або інших твердих частинок. Для попередження забруднення атмосфери промисловими викидами технологічні процеси необхідно вдосконалювати, довівши до мінімуму виділення, а також впроваджувати безвідходні замкнуті технологічні процеси. Однак в тих випадках, коли ці завдання неможливо вирішити, слід застосовувати найбільш ефективні і економічні засоби очищення повітря і газів перед викидом їх в атмосферу. Для повного виключення забруднень води необхідно при проектуванні очисних споруд стічні води розглядати як сировину для отримання цінних продуктів, а очищення води - як процес, необхідний для повторного її використання. Для санітарної очистки стічних вод створюються і освоюються нові ефективні установки і очисні споруди. Це дозволяє при постійному зростанні обсягів хімічного і Нафтохімічного виробництва безперервно зменшувати споживання, свіжої води в промисловості і знизити кількість стічних вод. Крім того, використовують термічні методи, що призводять до ліквідації стічних вод, а також методи закачування стічних вод в підземні горизонти. Для очищення



стічних вод на хімічних підприємствах застосовують два основних типи очисних споруд: локальні (цехові) і загальні (заводські). Застосування локальних установок дозволяє повторно використовувати очищену воду в тому ж технологічному процесі (в сі-систем повторно і оборотного водопостачання). Крупні хімічні та нафтохімічні підприємства постачають (заводськими) очисними спорудженнями які можуть включати первинну, вторинну і третинну очищення стічних вод.

### **Описи конструкції і принципу дії допоміжного обладнання**

В ході даного процесу необхідно підігрівати і охолоджувати рідко-сти до певних температур. Для цього необхідно використовувати теплообмінну апаратуру.

Так як найбільшого поширення набули поверхневі теплообмінники, в яких тепло передається через розділяє теплоносії стінку, то доцільно вибрати саме цей тип теплообмінних апаратів. Зокрема широко використовуються кожухотрубчасті теплообмінники. Вони досить прості у виготовленні, дозволяють досягати високих швидкостей теплоносія в трубах, відносно добре доступні для очищення і ремонту, особливо для очищення труб. У багатоходових теплообмінниках цього типу досить висока інтенсивність теплообміну.

Як підігрівача вихідної суміші використовуємо кожух-трубчастий двух-ходовой вертикальний теплообмінник з нерухомими трубними решітками. Кожухотрубчасті двухходовой теплообмінник зображений на рис 3.1.

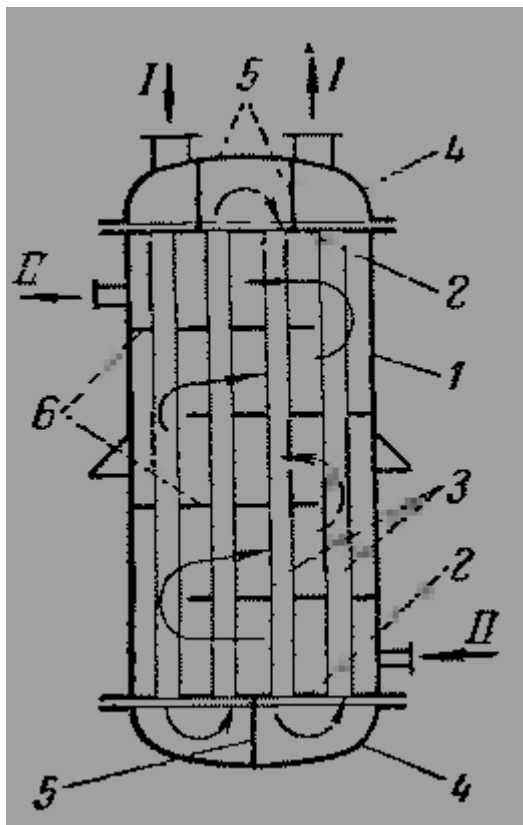


Рис 3.1 кожухотрубчасті двухходовой теплообмінник.

1 - кожух; 2 - трубні решітки; 3 - труби; 4 - кришки; 5 - перегородки в кришках 6 - перегородки в міжтрубному просторі; 7 - камера; 8 - перегородки в камерах; I, II- штуцера.

Теплообмінник складається з циліндричного корпусу (кожуха) 1 з встановленими на торцях його трубними ґратами 2 і штуцерами II.

В отворах трубних решіток, своїми кінцями закріплені труби 3. Сукупність цих труб називається трубним пучком. Трубочатка зверху і знизу закриті кришками з штуцерами I. Один теплоносіє (ацетон) подають в трубне простір, інший (етанол) в міжтрубний. Гарячий теплоносіє віддає холодного через стінки труб тепло. За допомогою поздовжньої перегородки 5, встановленої в кришці теплообмінника, труби розділені на ходи по яким послідовно рухається рідина, що протікає в трубному просторі теплообмінника. Для збільшення швидкості і подовження шляху руху середовища в міжтрубному просторі служать сегментні перегородки 6.

У підігрівачі вихідної суміші в якості гріючого теплоносія використовуємо насичена водяна пара. Цей теплоносіє має істотні

достоїнствами. В результаті конденсації пари отримуємо велике кількості тепла при відносно невеликій витраті пара, так як теплота конденсації його становить приблизно  $2,26 \cdot 10^6$  Дж / кг при тиску 1 ат. Внаслідок високих коефіцієнтів тепловіддачі від конденсується пара опір переносу тепла з боку пара мало. Це дозволяє проводити процес нагрівання при малій поверхні теплообміну. Важливою перевагою насиченої пари є сталість температури його конденсації, що дає можливість точно підтримувати температуру нагрівання, а також в разі необхідності регулювати її, змінюючи тиск пари, що гріє. Теплообмінник обраний згідно ГОСТ 15119-79: поверхню теплообміну  $F = 31$  м<sup>2</sup>, число ходів-2, число труб  $n = 166$  шт, довжиною труб  $l = 4$  м, з діаметром кожуха - 400 мм, . Вихідна суміш, де підігрівається від температури початкової - 20 ° С до температури кипіння - 62,24 ° С. Тиск насиченої водяної пари приймаємо 196,7 кПа, так як при високому тиску потрібно занадто толстостенная і дорога теплообмінна апаратура, а також великі витрати на комунікації і арматуру. Вихідну суміш направляємо від низу до верху, а гріючий пар в протилежному напрямку. Такий напрям руху кожної середовища збігається з напрямком, в якому прагне рухатися дана середу під впливом зміни її щільності при нагріванні або охолодженні. Також спостерігається при такому напрямку середовищ рівномірний розподіл швидкостей.

Як дефлегматора використовуємо кожухотрубчасті двоходовий-двой горизонтальний теплообмінник з нерухомими трубними решітка.

Дистилят конденсується в горизонтальному Кожухотрубчасті двоходовому теплообміннику, обраному згідно ГОСТ 15119-79: поверхню теплопередачі  $F = 173$  м<sup>2</sup>, діаметр кожуха - 800 мм, число ходів-2, труби  $d = 20 \times 2$  мм, число труб 690, довжина труб  $l = 4$  м. В якості охолоджувального агента використовуємо оборотну воду. Кінцеву температуру води приймаємо 44 ° С, щоб звести до мінімуму виділення розчинених у воді солей, що забруднюють теплообмінні поверхні і знижують ефективність теплообміну. Направляємо теплоносії противотоком для досягнення більшої величини

середньої рушійної сили.

Випарник являє собою кожухотрубчасті вертикальний двухходовой теплообмінник з поверхнею теплообміну рівній 208 м<sup>2</sup>, з діаметром кожуха - 800 мм, з діаметром труб - 25х2 мм, з довгою труб - 6 м, з числом ходів і труб відповідно 2 і 404. Направляємо теплоносії противотоком для досягнення більшої величини середньої рушійної сили.

### 3. Характеристика основних матеріалів

#### Характеристика сталі 03X17H14M3.

<b>Марка :</b>	03X17H14M3 (інше позначення 000X17H13M2)
<b>Класифікація:</b>	Сталь конструкційна кріогенна
<b>Застосування:</b>	зварні конструкції, що працюють в середовищах підвищеної агресивності при температурах до 196 ° С; сталь аустенітного класу
<b>Зарубіжні аналоги:</b>	Відомі

Хімічний склад у% сталі 03X17H14M3 **ГОСТ 5632 - 72**

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo
до 0.03	до 0.4	1 - 2	13 - 15	до 0.02	до 0.035	16 - 18	2.5 - 3.1

Технологічні властивості сталі 03X17H14M3 .

Сварюваність:	<b>без обмежень.</b>
---------------	----------------------

Механічні властивості при T = 20C сталі 03X17H14M3.

Сортамент	Размер	Напр.	$\sigma_{\text{в}}$	$\Sigma \tau$	$\delta 5$	$\psi$	KCU	Терморбр.
-	мм	-	МПа	Мпа	%	%	кДж/м <sup>2</sup>	
Пруток, ГОСТ 5949-75	60		490	196	40			Загартування 1070-1100 С, Охолодження у воді
Поковки, ГОСТ 25054-81			470	176	35-40	45-55		
Лист товстий, ГОСТ 7350-77			490	196	40			Загартування 1080-1100 С, Охолодження у воді
Лист тонкий, ГОСТ 5582-75			490	196	40			Загартування 1030-1070 С, повітря
Твердість 03X17H14M3, Поковки ГОСТ 25054-81								HВ 10 <sup>-1</sup> = 179МПа

Фізичні властивості сталі 03X17H14M3 .

Т	$E \cdot 10^{-5}$	$a \cdot 10^6$		$\rho$	C	$R \cdot 10^9$
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·г рад)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·гр ад)	Ом·м
20				8000		

#### 4. Визначення основних розмірів заданого підігрівача

##### Теплові розрахунки

Підігрівник вихідної суміші

Рівняння теплового балансу для підігрівника:

$$Q = 1,05 \cdot G_F \cdot C_F \cdot (t_{xf} - t_{нач}) = G_{г.п} r,$$

тут теплові втрати прийнято в розмірі 5% від кориснозатрачуваної теплоти;

$t_{xf}$  – температура кипіння вихідн суміші;

$t_{нач}$  – початкова температура (задана).

Питома теплоємність вихідної суміші

$$C_F = \alpha_F \cdot C_A + (1 - \alpha_F) \cdot C_B$$

де  $C_A, C_B$  - питомі теплоємності компонентів А и В при середній температурі  $t_{XF}^{cp} = \frac{t_{XF} + t_{нач}}{2} = \frac{64,5 + 26}{2} = 45,3^\circ\text{C}$ ;

$$C_A = 0,536 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; C_B = 0,438 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}},$$

$$C_F = 0,395 \cdot 0,536 + (1 - 0,395) \cdot 0,438 = 0,478 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} = 2004 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$Q = 1,05 \cdot G_F \cdot C_F (t_{xf} - t_{нач}) = 1,05 \cdot 2,361 \cdot 2004 (64,5 - 26) = 341999,8 \text{ Вт}$$

Витрата пари, що гріє:

$$G_{г.п} = \frac{Q}{r}$$

де  $r = 2106 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  питома теплота паротворення при  $P = 5,5 \text{ кгс/см}^2$

$$G_{\text{г.п}} = \frac{Q}{r} = \frac{341999,8}{2106 \cdot 10^3} = 0,157 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

Температура насиченої водяної пари при  $P = 5,5 \text{ кгс/см}^2$  становить  $154,6^\circ\text{C}$

Середня різниця температур

$$154,6^\circ\text{C} \longrightarrow 154,6^\circ\text{C}$$

$$26^\circ\text{C} \longrightarrow 64,5^\circ\text{C}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_6 = 154,6 - 26 = 128,6^\circ\text{C};$$

менша різниця температур:

$$\Delta t_m = 154,6 - 64,5 = 90,1^\circ\text{C}.$$

Так як  $\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} = \frac{128,6}{90,1} = 1,43 < 2$ , тоді середню різницю температур визначаємо

по рівнянню:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2},$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{128,6 + 90,1}{2} = 109,35^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт теплопередачі ухвалюємо орієнтовно рівним  $250 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$

Поверхня теплообміну підігрівника вихідної суміші



$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t} = \frac{34199,8}{250 \cdot 109,35} = 15,0 \text{ м}^2$$

Ухвалюємо двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник з наступними характеристиками:

- діаметр кожуха 400 мм;
- труба 25х2 мм;
- кількість труб у теплообміннику 100 шт;
- довжина труб 2 м;
- поверхня теплообміну 16 м<sup>2</sup>.

## 5. Розрахунок на міцність, жорсткість та стійкість підігрівача

### 5.1 Початкові данні

Тип апарата – ТНВ – 400.

Внутрішній діаметр кожуха $D$ , мм	400
Довжина теплообмінних труб $l$ , мм	2000
Зовнішній діаметр теплообмінної труби $d_m$ , мм	25
Товщина стінки труби $S_m$ , мм	2
Число ходів по трубах $i$	2
Розрахунковий тиск у трубному просторі $P_t$ , МПа	0,1
Розрахунковий тиск у міжтрубному просторі $P_k$ , МПа	0,55
Розрахункова температура труб $t_t$ , °C	64,5
Розрахункова температура кожуха $t_k$ , °C	154,6
Матеріал кожуха	03X17H14M3

Матеріал розподільної камери 03X17H14M3, кришки, трубної решітки та теплообмінних труб 03X17H14M3.

Група теплообмінника по трубному просторі	1
Група теплообмінника по міжтрубному просторі	1
Загальне число циклів навантаження	2000

### 5.2 Розрахункова температура

Розрахункову температуру розподільної камери  $t_k^*$ , °C, визначаємо

$$t_{кам} = 2 t_m - t_k = 2 \cdot 64,5 - 154,6 = -25,6 \text{ °C} \quad (5.50)$$

Розрахункову температуру ізольованих фланців визначаємо за формулою

$$t_{\phi} = t,$$

де  $t$  - розрахункова температура апарата, °C.

Таблиця 5.3 – Допустимі напружини матеріалів деталей теплообмінника

Елементи апарата	Матеріал	Допустимі напружини, МПа		Відношення допустимих напружин $[\sigma]_{20}/[\sigma]$
		при температурі 20 °C $[\sigma]_{20}$	при розрахунковій температурі $[\sigma]$	
Кожух	03X17H14M3	153	118	1,296
Трубна решітка	Сталь марки 03X17H14M3	153	118	1,296
Труби	Сталь марки 03X17H14M3	153	118	1,296
Фланці апаратні	Сталь марки 03X17H14M3	153	118	1,296
Фланці штуцерів трубного простору	Сталь марки 03X17H14M3	153	118	1,296
Фланці штуцерів міжтрубного простору	Сталь 03X17H14M3	153	118	1,296

Шпильки та гайки кріплення апаратних фланців та штуцерів трубного простору	Сталь 38ХА	160	218	0,734
Шпильки фланцевих з'єднань штуцерів міжтрубного простору	Сталь 38ХА	160	230	0,696
Гайки фланцевих з'єднань штуцерів міжтрубного простору	Сталь 38ХА	160	230	0,696

Примітка – Допустимі напружини при температурі 20 °С і розрахунковій температурі визначені методом лінійної інтерполяції за методичними вказівками [23].

Розрахункову температуру ізолюваних апаратних фланців і фланців штуцерів розподільної камери теплообмінника приймаємо рівною температурі розподільної камери, тобто  $t_{\phi} = t_{кам} = -25,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Розрахункову температуру ізолюваних фланців штуцерів кожуха приймаємо рівною температурі середовища міжтрубного простору тобто  $t_{\phi} = t_{\kappa} = 154,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Розрахункову температуру болтів для ізолюваних фланцевих з'єднань визначаємо

$$t_{\sigma} = 0,97 t \quad (5.52)$$

Розрахункова температура болтів корпусних фланцевих з'єднань та фланців штуцерів розподільної камери дорівнює

$$t_{\sigma} = 0,97 t_{\text{кам}} = 0,97 \cdot (-25,6) = -24,832^{\circ}\text{C}.$$

Розрахункова температура болтів фланцевих з'єднань штуцерів міжтрубного простору

$$t_{\sigma} = 0,97 t_{\kappa} = 0,97 \cdot 154,6 = 149,962^{\circ}\text{C}.$$

### 5.3 Допустимі напружини

Допустимі напружини при розрахунковій температурі  $[\sigma]$  і при температурі  $20^{\circ}\text{C}$   $[\sigma]_{20}$ , МПа, для матеріалів елементів апарата приведені в таблиці 5.3.

Пробний тиск, при якому проводиться випробування апарата, визначаємо

$$P_{np} = 1,25 P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \quad (5.53)$$

Відношення  $[\sigma]_{20}/[\sigma]$  приймаємо по тому із використовуваних матеріалів елементів кожної порожнини апарата, для якої воно є найменшим.

Для трубного простору при мінімальному відношенні допустимих напружин  $[\sigma]_{20}/[\sigma] = 1,296$  пробний тиск складає

$$P_{np\ m} = 1,25 P_m \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,25 \cdot 0,1 \cdot 1,296 = 0,162 \text{ МПа}.$$

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору теплообмінника складає

$$P_{z\ mp} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,85 \cdot 10^{-6} = 0,018 \text{ МПа}, \quad (5.54)$$

$H_c$  – висота стовпа води у трубному просторі (відстань між фланцями штуцерів у розподільній камері).

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору

$$P_{\varepsilon mp} = 0,018 \leq 0,05 \quad P_{np m} = 0,05 \cdot 0,162 = 0,0081 \text{ МПа}$$

складає менше 5% від пробного, тому за розрахунковий тиск в умовах випробувань приймаємо пробний

$$P_{i m} = P_{np m} = 0,162 \text{ МПа.}$$

Умова

$$P_{i m} = 0,162 \text{ МПа} \leq 1,35 P_m \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 0,1 \cdot 1,296 = 0,175 \text{ МПа}$$

виконується, тому розрахунок елементів трубного простору в умовах гідравлічних випробувань проводити не потрібно.

Для міжтрубного простору при відношенні допустимих напружин  $[\sigma]_{20} / [\sigma] = 1,15$  пробний тиск складає

$$P_{np \kappa} = 1,25 P_{\kappa} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,25 \cdot 0,55 \cdot 1,296 = 0,891 \text{ МПа}$$

(5.55)

Гідростатичний тиск при випробуванні міжтрубного простору

$$P_{\varepsilon \kappa} = \rho_{\varepsilon} \cdot g \cdot H_{\varepsilon} \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} = 0,015 < 0,05 \quad P_{np \kappa} = 0,05 \cdot 0,891 = 0,044 \text{ МПа}$$

складає менше 5% від пробного, тому за розрахунковий тиск в умовах випробувань приймаємо пробний.

Умова

$$P_{i \kappa} = 2,75 \leq 1,35 P_{\kappa} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 0,55 \cdot 1,296 = 0,962 \text{ МПа}$$

виконується, тому розрахунок елементів міжтрубного простору в умовах гідравлічних випробувань проводити не потрібно.

## 5.4 Коефіцієнти міцності зварних швів

Трубний простір теплообмінника за розрахунковим тиском, температурою та характером робочого середовища відноситься до 1 групи посудин, для якої

довжина контрольованих швів складає 100 % від їх загальної довжини. Для стикових швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичною зваркою, коефіцієнт міцності зварних швів трубного простору приймаємо

$$\varphi_p = 1,0$$

Міжтрубний простір теплообмінника за розрахунковим тиском, температурою та характером робочого середовища відноситься до 1 групи посудин, для яких довжина контрольованих швів складає 100 % від загальної довжини кожного шва. Для стикових (поздовжніх) швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичною зваркою, при контрольованій довжині швів 100 %, коефіцієнт міцності зварних швів міжтрубного простору приймається рівним  $\varphi_p = 1,0$ .

Для стикових (кільцевих) швів, які доступні зваренню лише з одного боку та мають в процесі зварки металеву підкладку з боку кореня шва, котра прилягає по всій довжині шва до основного металу, при контрольованій довжині швів 100 %, коефіцієнт міцності зварних кільцевих швів міжтрубного простору приймаємо рівним  $\varphi_m = 1$ .

## 5.5 Додатки до розрахункових величин

Суми доданок до розрахункових величин визначаємо за формулою

$$C = C_1 + C_2, \quad (5.56)$$

де  $C_1$  — доданка для компенсації корозії та ерозії, мм;

$C_2$  — доданка для компенсації мінусового допуску, мм.

Додатку для компенсації корозії та ерозії  $C_1$  розраховуємо

$$C_1 = \Pi \cdot \tau + C_9, \text{ мм}, \quad (5.57)$$

де  $\Pi$  — швидкість проникнення корозії, мм/год;

$\tau$  — розрахунковий строк служби теплообмінника, рок;

$C_3$  – добування для компенсації ерозії, мм.

Добавку для компенсації ерозії не враховуємо, приймаючи, що теплообмінник працює з чистими рідкими середовищами (без твердих або абразивних частинок), а швидкість руху середовища складає менше 20 м/с.

Швидкість проникнення корозії для матеріалу міжтрубного простору приймаємо  $\Pi_k = 0,05$  мм/рік, а трубного –  $\Pi_m = 0$  мм/рік.

Добавка для компенсації корозії та ерозії складає:

– для труб з боку трубного та міжтрубного просторів

$$C_{1m} = 0 \text{ мм};$$

– для кожуха

$$C_{1k} = \Pi_k \cdot \tau = 0,05 \cdot 10 = 0,5 \text{ мм}.$$

Добавку для компенсації мінусового допуску  $C_2$ , мм, приймаємо за методичними вказівками [25].

## 5.6 Розрахунок кожуха теплообмінника

Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки кожуха теплообмінника

Розрахункову товщину стінки кожуха від дії внутрішнього тиску визначаємо за формулою

$$S_{pk} = \frac{P_k \cdot D}{2[\sigma]_k \cdot \varphi_p - P_k}, \quad (5.58)$$

де  $P_k$  – розрахунковий тиск у міжтрубному просторі теплообмінника при розрахунковій температурі, МПа;

$D$  – внутрішній діаметр обичайки кожуха, мм;

$\varphi_p$  – коефіцієнт міцності поздовжніх зварних швів.



$$S_{p\kappa} = \frac{0,55 \cdot 400}{2 \cdot 118 \cdot 1 - 0,55} = 0,93 \text{ мм.}$$

Виконавчу товщину стінки кожуха визначаємо за формулою

$$S \geq S_p + C \quad (5.59)$$

Відповідно методичним вказівкам [12] приймаємо виконавчу товщину стінки кожуха рівною  $S_{\kappa} = 6$  мм. Добавка для компенсації мінусового допуску для сталевих листів товщиною 6 мм складає  $C_2 = 0,6$  мм. Добавку

$$C_2 = 0,6 > 0,05S = 0,05 \cdot 6 = 0,3 \text{ мм}$$

враховуємо, так як вона перевищує 5 % від номінальної товщини листа.

Сума добавок до розрахункової товщини стінки кожуха складає

$$C_{\kappa} = C_{1\kappa} + C_{2\kappa} = 0,5 + 0,6 = 1,1 \text{ мм.}$$

Виконавчу товщину стінки кожуха визначаємо за формулою

$$S_{\kappa} \geq S_{p\kappa} + C_{\kappa} = 0,93 + 1,1 = 2,03 \text{ мм.}$$

Остаточно приймаємо виконавчу товщину стінки кожуха рівною  $S_{\kappa} = 6$  мм.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск в кожусі визначаємо за формулою

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)} = \frac{2 \cdot 118 \cdot 1 \cdot (6 - 1,1)}{400 + (6 - 1,1)} = 2,856 \text{ МПа.}$$

(5.60)

Умова міцності  $P_{\kappa} = 0,55 \text{ МПа} \leq [P]_{\kappa} = 2,856 \text{ МПа}$  виконується.

Умова застосування розрахункових формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{6 - 1,1}{400} = 0,012 \leq 0,1$$

Умова виконується.

### 5.6.1 Визначення допоміжних величин

Коефіцієнт ослаблення трубної решітки визначаємо за формулою

$$\varphi_p = 1 - d_0/t_p = 1 - 20,15/32 = 0,37. \quad (5.61)$$

Відстань від осі кожуха до осі найбільш віддаленої труби приблизно визначаємо за формулою

$$a_1 = 0,5 (D_0 - d_m), \quad (5.62)$$

де  $D_0$  – діаметр окружності, за межу якої не повинні виступати теплообмінні труби.

$$a_1 = 0,5 \cdot (360 - 25) = 167 \text{ мм.}$$

Відносну характеристику краю трубної решітки визначаємо за формулою

$$m_n = 0,5 D/a_1 = 0,5 \cdot 400/167 = 1,197. \quad (5.63)$$

Коефіцієнти впливу тиску на трубну решітку визначаємо за формулами:

$$\eta_\kappa = 1 - \frac{i d_m^2}{4 a_1^2} = 1 - \frac{91 \cdot 25^2}{4 \cdot 167^2} = 0,49; \quad (5.64)$$

де  $i$  – число труб у трубній решітці.

$$\eta_m = 1 - \frac{i (d_m - 2 s_m)^2}{4 a_1^2} = 1 - \frac{91 \cdot (25 - 2 \cdot 2)^2}{4 \cdot 167^2} = 0,64 \quad (5.65)$$

Коефіцієнт жорсткості трубної решітки визначаємо за формулою

$$\psi_0 = \eta_m^{2,33} = 0,64^{2,33} = 0,354. \quad (5.66)$$

Модуль пружності основи (системи труб) визначаємо за формулою

$$K_y = \frac{2 E_m \cdot (\eta_m - \eta_\kappa)}{l} = \frac{2 \cdot 197 \cdot 10^3 \cdot (0,64 - 0,49)}{2000} = 29,25$$

(5.67)

Приведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха розраховуємо за формулою

$$\rho = \frac{K_y \cdot a_1 \cdot l}{2 E_\kappa \cdot S_\kappa} = \frac{29,25 \cdot 167 \cdot 2000}{2 \cdot 191 \cdot 10^3 \cdot 6} = 4,13. \quad (5.68)$$

Коефіцієнти змінення жорсткості системи труби-кожух визначаємо за формулами:

$$K_q = 1 + K_q^* + K_q^{**} = 1 + 0 + 0 = 1; \quad (5.69)$$

$$K_p = 1 + K_p^* + K_p^{**} = 1 + 0 + 0 = 1 \quad (5.70)$$

Безрозмірний коефіцієнт  $m_{cp}$  розраховуємо за формулою

$$m_{cp} = 0,15 \cdot \frac{i \cdot (d_m - S_m)^2}{a_1^2}, \quad (5.71)$$

де  $i$  – число труб у трубній решітці.

$$m_{cp} = 0,15 \cdot \frac{91 \cdot (25 - 2)^2}{167^2} = 0,259.$$

Приведений тиск визначаємо за формулою

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,5 [\alpha_\kappa \cdot (t_\kappa - t_0) - \alpha_m \cdot (t_m - t_0)] \cdot K_y \cdot l + \\ &+ [\eta_m - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0,5 \rho \cdot K_q)] \cdot P_m - \\ &- [\eta_\kappa - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0,3 \rho \cdot K_p)] \cdot P_\kappa = \\ &= 0,5 \cdot [11,6 \cdot 10^{-6} \cdot (210 - 20) - 13,2 \cdot 10^{-6} \cdot (120 - 20)] \cdot 29,25 \cdot 2000 + \\ &+ [0,64 - 1 + 0,259 + 1,197 \cdot (1,197 + 0,5 \cdot 4,13 \cdot 1)] \cdot 0,397 - \\ &- [0,49 - 1 + 0,259 + 1,197 \cdot (1,197 + 0,3 \cdot 4,13 \cdot 1)] \cdot 2,75 = \\ &= 20,04 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Коефіцієнт системи решітка-труби розраховуємо за формулою

$$\beta = \frac{1,82}{S_p} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_y \cdot S_p}{\psi_0 \cdot E_p}} = \frac{1,82}{25} \sqrt[4]{\frac{29,25 \cdot 25}{0,354 \cdot 191 \cdot 10^3}} = 0,026 \quad (5.72)$$

Коефіцієнти системи кожух-решітка і обичайка-фланець камери  $\beta_1$  і  $\beta_2$  визначаємо за формулами:

$$\beta_1 = \frac{1,84}{\sqrt{D \cdot S_1}} = \frac{1,84}{\sqrt{400 \cdot 6}} = 0,038; \quad (5.73)$$

$$\beta_2 = \frac{1,84}{\sqrt{D \cdot S_2}} = \frac{1,84}{\sqrt{400 \cdot 6}} = 0,038.$$

Радіуси центрів ваги тарілок фланців кожуха і розподільної камери розраховуємо за формулою

$$R_1 = R_2 = 0,25 (D_n + D) = 0,25 \cdot (560 + 400) = 240 \text{ мм}, \quad (5.74)$$

а ширини фланців – за формулою

$$b_1 = b_2 = 0,5 \cdot (D_n - D) = 0,5 \cdot (560 - 400) = 120 \text{ мм}, \quad (5.75)$$

де  $D_n = 560$  мм.

Коефіцієнти  $K_1$  і  $K_2$  обчислюємо за формулами:

$$K_1 = \frac{\beta_1 \cdot D \cdot E_\kappa \cdot S_1^3}{11 R_1} = \frac{0,038 \cdot 400 \cdot 206 \cdot 10^3 \cdot 6^3}{11 \cdot 240} = 2,56 \cdot 10^5; \quad (5.76)$$

$$K_2 = \frac{\beta_2 \cdot D \cdot E_o \cdot S_2^3}{11 R_2} = \frac{0,038 \cdot 400 \cdot 191,6 \cdot 10^3 \cdot 6^3}{11 \cdot 240} = 2,38 \cdot 10^5 \quad (5.77)$$

Приймаємо товщини фланців трубного пучка і розподільної камери відповідно  $h_1 = 38$  мм,  $h_2 = 35$  мм.

Коефіцієнти жорсткості  $K_{\phi 1}$  і  $K_{\phi 2}$  розраховуємо за формулами:

$$K_{\phi 1} = \frac{E_1 \cdot h_1^3 \cdot b_1}{12 R_1^2} + K_1 \cdot \left(1 + \frac{\beta_1 \cdot h_1}{2}\right) = \frac{191,6 \cdot 10^3 \cdot 38^3 \cdot 120}{12 \cdot 240^2} + 2,56 \cdot 10^5 \cdot \left(1 + \frac{0,038 \cdot 38}{2}\right) = 2,26 \cdot 10^6$$

Н·мм;

$$K_{\phi 2} = \frac{E_2 \cdot h_2^3 \cdot b_2}{12 R_2^2} + K_2 \cdot \left(1 + \frac{\beta_2 \cdot h_2}{2}\right) = \frac{191,6 \cdot 10^3 \cdot 35^3 \cdot 120}{12 \cdot 240^2} + 2,38 \cdot 10^5 \cdot \left(1 + \frac{0,038 \cdot 35}{2}\right) = 1,85 \cdot 10^6 \text{ Н·мм}.$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання при згині розраховуємо за формулою

$$K_\phi = K_{\phi 1} + K_{\phi 2} = 2,26 \cdot 10^6 + 1,85 \cdot 10^6 = 4,11 \cdot 10^6 \text{ Н·мм}.$$

Коефіцієнти впливу тиску на згин фланців розраховуємо за формулами

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 \cdot h_1}{2 \beta_1^2} = \frac{1 + 0,038 \cdot 38}{2 \cdot 0,038^2} = 846 \text{ мм}^2; \quad (5.78)$$

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 \cdot h_2}{2 \beta_2^2} = \frac{1 + 0,038 \cdot 35}{2 \cdot 0,038^2} = 806 \text{ мм}^2$$

Приведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання розраховуємо за формулою

$$\rho_1 = \frac{K_y \cdot D \cdot a_1}{2 \beta^2 \cdot K_\phi \cdot R_1} = \frac{29,25 \cdot 400 \cdot 167}{2 \cdot 0,04^2 \cdot 4,11 \cdot 10^6 \cdot 240} = 0,619 \quad (5.79)$$

Значення коефіцієнтів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  визначаємо за таблицею 2 [25] залежно від величини  $\omega$ , яку розраховуємо за формулою

$$\omega = \beta \cdot a_1 = 0,04 \cdot 167 = 6,68$$

$$\Phi_1 = 10,51; \quad \Phi_2 = 7,17; \quad \Phi_3 = 10,24.$$

Значення коефіцієнтів  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  визначаємо за таблицею 3 [25] залежно від коефіцієнта  $\omega$  і відносної характеристики безтрубного краю трубної решітки  $m_n = 1,197$  :  $T_1 = 58,9$ ;  $T_2 = 21,1$ ;  $T_3 = 12,3$ .

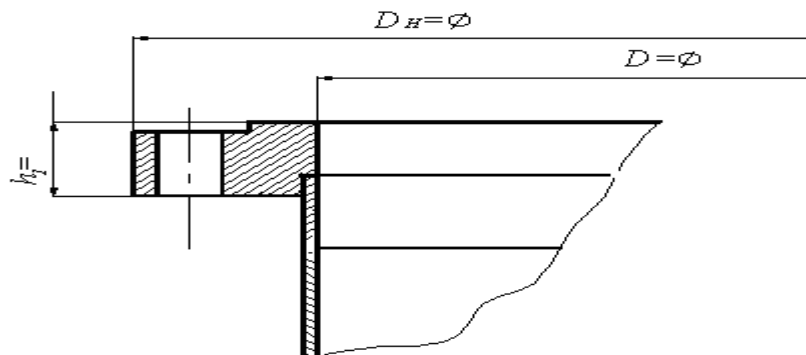


Рисунок 5.7 – Фланець кожуха

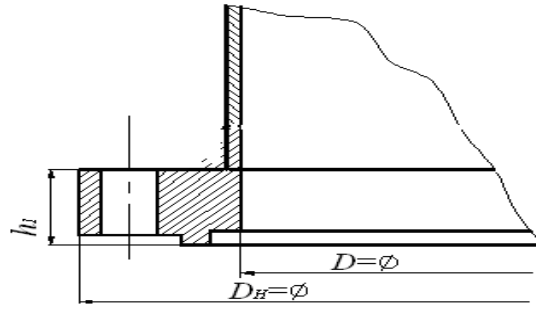


Рисунок 5.8 – Фланец розподільної камери

### 5.6.2 Визначення зусиль в елементах апарата

Тиск  $P_1$  визначаємо за формулою

$$P_1 = \frac{K_y}{\beta \cdot K_\phi} \cdot (m_1 \cdot P_\kappa - m_2 \cdot P_m) = \frac{29,25}{0,04 \cdot 4,11 \cdot 10^6} \cdot (846 \cdot 0,55 - 806 \cdot 0,1) = 0,0684 \text{ МПа.}$$

Згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки

$$M = \frac{a_1}{\beta} \cdot \frac{P_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - P_o \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = \frac{167}{0,04} \cdot \frac{0,0684 \cdot (58,9 + 4,13 \cdot 1) - 20,04 \cdot 21,1}{(58,9 + 4,13 \cdot 1) \cdot (12,3 + 0,619) - 21,1^2} = -4734 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм.}$$

Перерізувальну силу, розподілену по периметру трубної решітки

$$Q = \frac{a_1 \cdot [P_o \cdot (T_3 + \rho_1) - P_1 \cdot T_2]}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = \frac{167 \cdot [20,04 \cdot (12,3 + 0,619) - 0,0684 \cdot 21,1]}{(58,9 + 4,13 \cdot 1) \cdot (12,3 + 0,619) - 12,3^2} = 64,8 \text{ Н/мм.}$$

Згинальний момент, розподілений по периметру перфорованої зони трубної решітки, визначаємо за формулою

$$M_a = M + (0,5 D - a_1) \cdot Q = -4734 + (0,5 \cdot 400 - 167) \cdot 64,8 = -2595,6 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм.}$$

(5.80)

Перерізувальну силу, розподілену по периметру перфорованої зони трубної решітки, розраховуємо за формулою

$$Q_a = m_n \cdot Q = 1,197 \cdot 64,8 = 77,56 \text{ Н/мм} \quad (5.81)$$

Осьову силу, яка діє на трубу, визначаємо за формулою

$$N_m = \frac{\pi \cdot a_1}{i} \cdot [(\eta_\kappa \cdot P_\kappa - \eta_m \cdot P_m) \cdot a_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_a] =$$

$$\frac{3,14 \cdot 167}{91} \cdot [(0,49 \cdot 0,55 - 0,64 \cdot 0,1) \cdot 167 + \quad + 10,51 \cdot 77,56 - 7,17 \cdot 0,04 \cdot 2595,6] = 4852 \text{ Н.}$$

(5.82)

Момент інерції поперечного перерізу труби визначаємо за формулою

$$I_m = \frac{\pi}{64} \cdot [(d_m - 2 C_4)^4 - (d_m - 2 S_m + 2 C_5 + 2 C_6)^4] =$$

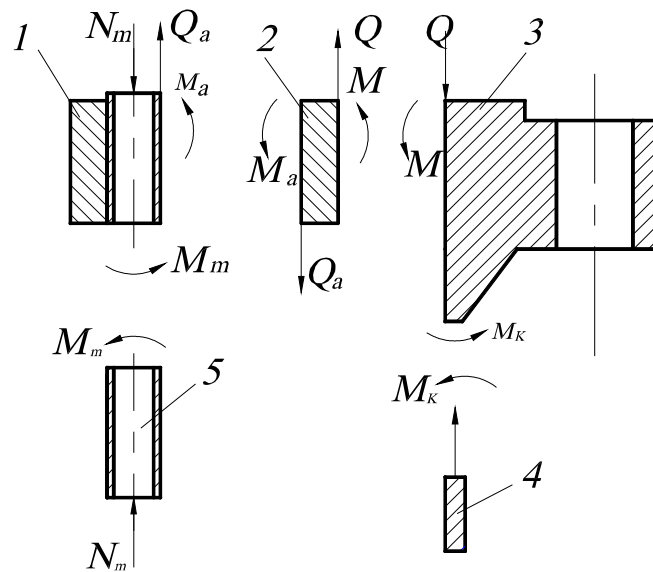
$$= \frac{3,14}{64} \cdot [(25 - 2 \cdot 0)^4 - (25 - 2 \cdot 2 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot 0,2)^4] = 7781 \text{ мм}^4.$$

(5.83)

Максимальний проліт між решіткою та перегородкою визначаємо за технічними умовами,  $l_{1p} = 250 \text{ мм}$ .

Приведену розрахункову довжину труби для теплообмінного апарата з перегородками визначаємо за формулою

$$l_{np} = 0,33 l_{1p} = 0,33 \cdot 250 = 82,5 \text{ мм},$$



1 – перфорована частина трубної решітки; 2 – неперфорована частина трубної решітки; 3 – фланець; 4 – кожух; 5 – труба

**Рисунок 5.8 – Розрахункова схема вузла з'єднання трубної решітки з плоским фланцем, кожухом і трубами**

Згинальний момент, діючий на трубу, розраховуємо за формулою

$$M_m = \frac{E_m \cdot I_m \cdot \beta}{K_y \cdot a_1 \cdot l_{np}} \cdot (\Phi_2 \cdot Q_a + \Phi_3 \cdot \beta \cdot M_a) =$$

$$= \frac{197 \cdot 10^3 \cdot 7781 \cdot 0,04}{29,25 \cdot 167 \cdot 82,5} \cdot (7,17 \cdot 77,56 + 10,24 \cdot 0,04 \cdot 2442) = 2,36 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

(5.84)

Осьове зусилля, розподілене по периметру кожуха, визначаємо за формулою

$$Q_\kappa = 0,25 D \cdot P_m - Q = 0,25 \cdot 400 \cdot 0,1 - 64,8 = -54,8 \text{ Н/мм}.$$

Згинальний момент, розподілений по периметру кожуха, визначаємо за формулою

$$M_\kappa = \frac{K_1}{\rho_1 \cdot K_\phi \cdot \beta} \cdot (T_2 \cdot Q + T_3 \cdot \beta \cdot M) - \frac{P_\kappa}{2 \beta_1^2} =$$



$$= \frac{2,56 \cdot 10^5}{0,619 \cdot 4,11 \cdot 10^6 \cdot 0,04} \cdot [21,1 \cdot 64,8 + 12,30,04 \cdot (-4734)] - \frac{2,7}{2,0,038^2} = -3,35 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм}.$$

(5.85)

Осьове зусилля в кожусі обчислюємо за формулою

$$F = \pi \cdot D \cdot Q_{\kappa} = 3,14400 \cdot 54,8 = 68828 \text{ Н} \quad (5.86)$$

### 5.6.3 Визначення напружин в елементах апарата

Напружини в трубній решітці в місці з'єднання з кожухом визначаємо за формулами:

– згинальні

$$\sigma_{p1} = \frac{6|M|}{(S_{1p} - C_1 - C_2 - C_3)^2} = \frac{6|-4734|}{(25 - 0 - 0,5 - 0,52)^2} = 49,39 \text{ МПа};$$

– дотичні

$$\tau_{p1} = \frac{|Q|}{S_{1p} - C_1 - C_2 - C_3} = \frac{|64,8|}{25 - 0 - 0,5 - 0,52} = 2,702 \text{ МПа}.$$

Добавку для компенсації мінусового допуску до товщини трубної решітки по 14 квалітету точності приймаємо рівною  $C_2 = 0,52 \text{ мм}$ .

Параметр  $m$  обчислюємо за формулою

$$m = \beta \cdot M_a / Q_a = 0,04 \cdot 2595,6 / 77,56 = 1,338 \quad (5.87)$$

Коефіцієнт  $A$  визначаємо за таблицею 4 [25],  $A=0,75$ .

Так як  $m \geq 1,0$ , момент  $M_{\max}$  розраховуємо за формулою

$$M_{\max} = B \cdot |M_a| = 0,875 \cdot 2595,6 = 2271,15 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм}$$

де  $B$  - коефіцієнт, визначуваний по таблиці 5 залежно від відношення.

$$n = Q / (\beta \cdot M_a) = 64,8 / (0,04 \cdot (-2595,6)) = -0,624$$

Напружини в перфорованій частині трубної решітки розраховуємо за формулами:

– згинальні

$$\sigma_{p2} = \frac{6 M_{\max}}{\varphi_p \cdot (S_p - C_1 - C_2 - C_3)^2} = \frac{6 \cdot 2271,15}{0,37 \cdot (25 - 0 - 0,5 - 0,52)^2} = 64,04 \text{ МПа};$$

– дотичні

$$\tau_{p2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_p \cdot (S_p - C_1 - C_2 - C_3)} = \frac{|77,56|}{0,37 \cdot (25 - 0 - 0,5 - 0,52)} = 8,74 \text{ МПа}.$$

Розрахункові напружини в кожусі в місці приєднання до решітки розраховуємо за формулами:

– у меридіональному напрямку:

– мембранні

$$\sigma_{mx} = \frac{|Q_\kappa|}{S_1 - C_7 - C_8} = \frac{|-54,8|}{6 - 0,5 - 0,8} = 11,65 \text{ МПа};$$

– згинальні

$$\sigma_{ux} = \frac{6 |M_\kappa|}{(S_1 - C_7 - C_8)^2} = \frac{6 \cdot |-3,35 \cdot 10^3|}{(6 - 0,5 - 0,52)^2} = 810 \text{ МПа};$$

– в окружному напрямку:

– мембранні

$$\sigma_{m\varphi} = \frac{0,5 |P_\kappa| \cdot D}{S_1 - C_7 - C_8} = \frac{0,5 \cdot |0,55| \cdot 400}{6 - 0,5 - 0,52} = 22,08 \text{ МПа};$$

– згинальні

$$\sigma_u = 0,3 \sigma_{ux} = 0,3 \cdot 810 = 243 \text{ МПа}.$$

Розрахункові напружини в трубах визначаємо за формулами:

– в осьовому напрямку:

$$\sigma_{1m} = \frac{|N_m|}{\pi \cdot (d_m - S_m) \cdot S_m} = \frac{|4852|}{3,14 \cdot (25 - 2) \cdot 2} = 33,59 \text{ МПа};$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1m} + \frac{0,5 d_m \cdot |M_m|}{I_m} = 7,5 + \frac{0,5 \cdot 25 \cdot |2,36 \cdot 10^5|}{7781} = 386 \text{ МПа};$$

– в окружному напрямку

$$\sigma_{2m} = 0,5 \cdot (d_m + S_m) \cdot P / 2 = 0,5 \cdot (25 + 2) \cdot 0,397 / 2 = 2,68 \text{ МПа}.$$

#### 5.6.4 Розрахунок трубних решіток на міцність і жорсткість

Умова статичної міцності трубної решітки, що визначається за формулою

$$\max \{ \tau_{p1}; \tau_{p2} \} \leq 0,5 [\sigma]_p = \max \{ 2,644; 8,55 \} = 8,55 \text{ МПа} < 0,5 \cdot 168 = 84 \text{ МПа}$$

виконується.

Перевірку на міцність трубної решітки при малоциклових навантаженнях проводимо за формулою

$$\sigma_a = 0,5 K_\sigma \cdot \max \{ | \Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2 |; | \Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3 |; | \Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1 | \} \leq [\sigma_a]$$

При перевірці трубної решітки на малоциклову міцність приймаємо:

– в місці з'єднання з кожухом:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{p1} = 49,39 \text{ МПа};$$

$$\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0;$$

$$K_\sigma = 1,7;$$

$$\sigma_a = 0,5 \cdot 1,7 \cdot \max \{ | 49,39 - 0 |; | 0 - 0 |; | 0 - 49,39 | \} = 41,9 \text{ МПа};$$

– у перфорованій частині:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{p2} = 64,04 \text{ МПа};$$

$$\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0;$$

$$K_\sigma = 1;$$

$$\sigma_a = 0,5 \cdot 1 \cdot \max \{ | 64,04 - 0 |; | 0 - 0 |; | 0 - 64,04 | \} = 32,02 \text{ МПа}.$$

Допустиму амплітуду напружин розраховуємо за формулою

$$[\sigma_a] = \frac{2300-t}{2300} \cdot \frac{A}{\sqrt{n_N \cdot N}} + \frac{B}{n_\sigma} = \frac{2300-130}{2300} \cdot \frac{0,6 \cdot 10^5}{\sqrt{10 \cdot 2000}} + \frac{270}{2} = 518 \text{ МПа} \quad (5.88)$$

Умови міцності трубної решітки при малоциклових навантаженнях в місці з'єднання з кожухом

$$\sigma_a = 41,9 < [\sigma_a] = 518 \text{ МПа}$$

і в перфорованій частині

$$\sigma_a = 32,02 < [\sigma_a] = 518 \text{ МПа}$$

виконуються.

Розрахункову товщину трубної решітки визначаємо за формулою

$$S_{pp} = 0,5 \cdot (S_p - C_1 - C_2 - C_3) \cdot \frac{\sigma_{p2}}{[\sigma_a]} = 0,5 \cdot (20 - 0 - 0,5 - 0,52) \cdot \frac{64,04}{518} = 1,1 \text{ мм.}$$

Розрахункову товщину трубної решітки в перерізу канавки під поздовжню перегородку розраховуємо за формулою

$$S_{np} = S_{pp} \cdot \max \left\{ 1 - \sqrt{\frac{d_0}{b_n} \cdot \left( \frac{t_n}{t_p} - 1 \right)}; \sqrt{\phi_p} \right\} =$$

$$15,4 \cdot \max \left\{ \left[ 1 - \sqrt{\frac{20,15}{8} \cdot \left( \frac{55,4}{32} - 1 \right)} = 0,357; \sqrt{0,37} = 0,608 \right] \right\} = 9,67 \text{ мм} \quad (5.89)$$

Виконавчу товщину трубної решітки в перерізу канавки під поздовжню перегородку розраховуємо за формулою

$$S_n \geq S_{np} + C_p = 9,67 + 1,1 = 10,74 \text{ мм}$$

Раніше прийнята товщина трубної решітки в перерізу паза під поздовжню перегородку задовольняє умові міцності.

### 5.6.5 Розрахунок кожуха на міцність та стійкість

Умова статичної міцності кожуха в місці приєднання до решітки

$$\sigma_{mx} = 5,04 \leq 1,3 [\sigma]_k = 1,3 \cdot 146 = 189,8 \text{ МПа}$$

виконується.

Допустиму амплітуду напружин в кожусі в місці приєднання до решітки визначаємо за формулою

$$[\sigma_{ак}] = \frac{2300-t}{2300} \cdot \frac{A_1}{\sqrt{n_N \cdot N}} + \frac{B}{n_\sigma} = \frac{2300-130}{2300} \cdot \frac{0,6 \cdot 10^5}{\sqrt{10 \cdot 2000}} + \frac{196,1}{2} = 484 \text{ МПа}$$

Перевірку кожуха в місці приєднання до решітки на малоциклову міцність проводимо за формулою. При цьому приймаємо

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{mx} + \sigma_{ux} = 11,65 + 810 = 821,65 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_2 = \sigma_{m\phi} + \sigma_{u\phi} = 22,08 + 243 = 265,08 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_3 = 0.$$

$$\sigma_a = 0,5 K_\sigma \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} |\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2| \\ |\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3| \\ |\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1| \end{array} \right\} =$$

$$0,5 \cdot 1 \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} |821,65 - 265,08| = 556,57 \\ |265,08 - 0| = 265,08 \\ |0 - 821,65| = 821,65 \end{array} \right\} = 410,82 \text{ МПа} \leq [\sigma_a] = 518 \text{ МПа}$$

Умова виконується.

### 5.6.6 Розрахунок труб на міцність та стійкість

Допустиму напружину для матеріалу труб при розрахунковій температурі розраховуємо за методичними вказівками [23],  $[\sigma_m] = 118 \text{ МПа}$ .

Умова статичної міцності труб

$$\max \{ \sigma_{1m}; \sigma_{2m} \} = \max \{ 7,5; 2,68 \} = 7,5 \leq [\sigma_m] = 118 \text{ МПа}$$

виконується.

Перевіряємо труби на малоциклову міцність за формулою. При цьому

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 = 410,82 \text{ МПа}; \quad \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0; \quad K_\sigma = 1.$$

Допустиму амплітуду напружин в трубах розраховуємо за формулою

$$[\sigma_{am}] = \frac{2300 - 160}{2300} \cdot \frac{0,6 \cdot 10^5}{\sqrt{10 \cdot 1000}} + \frac{270}{2} = 513 \text{ МПа.}$$

Умова малоциклової міцності труб

$$\sigma_{am} = 0,5 K_{\sigma} \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} |\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2| \\ |\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3| \\ |\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1| \end{array} \right\} = 0,5 \cdot 1 \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} |410,82 - 0| \\ |0 - 0| \\ |0 - 410,82| \end{array} \right\} = 205,41 \text{ МПа} \leq [\sigma_{am}] = 513 \text{ МПа}$$

ВИКОНУЄТЬСЯ.

### 5.6.7 Розрахунок кріплення труб в трубній решітці

Безрозмірний коефіцієнт  $\varphi_c$  визначаємо за формулою

$$\varphi_c = \min \{0,5; 0,95 - 0,2 \lg N\} = \min \{0,5; 0,95 - 0,2 \lg 2000\} = 0,29$$

Умова кріплення труб в решітці приваркою з наступною розвальцьовкою

$$\tau = \frac{|N_m| \cdot d_m + 4 |M_m|}{\pi \cdot d_m^2 \cdot \delta} = \frac{|4852| \cdot 25 + 4 \cdot |2,36 \cdot 10^3|}{3,14 \cdot 25^2 \cdot 2} = 33,3 \leq$$

$$\leq \varphi_c \cdot \min \{ [\sigma]_m; [\sigma]_p \} = 0,29 \min \{ [168]; [168] \} = 48,72 \text{ МПа}$$

ВИКОНУЄТЬСЯ.

## 6. Технологія виготовлення

Технологічний процес виготовлення теплообмінного апарату в загальному випадку складається з отримання заготовок, механічної обробки заготовок до розмірів готових деталей і складання деталей вузлів (складальних одиниць) і всього апарату в цілому

Виготовлення корпусів багатьох теплообмінних апаратів енергоустановок (ПСГ, ПНД, ПВД, маслоохладителей і ін.) Мають циліндричну форму. Циліндрична частина корпусу діаметром до 800 мм може бути виконана у вигляді обичайки з одного свальцованного в циліндр листа; обичайки діаметром до 1600 мм - з двох аркушів, свальцованих в півциліндри (корита), і з кількох обичайок при великій довжині корпусу, що визначається розмірами листового прокату, що випускається промисловістю. Корпуси апаратів коробчатої (багатокутної) форми також виготовляються з листів необхідних розмірів. Листовий метал, призначений для виготовлення корпусів, піддають попередній обробці, що полягає в правці і розділовій різанні листів, що полегшує їх транспортування і наступні операції обробки.

Виправлення. Листову сталь, призначену для виготовлення корпусів і інших деталей апаратів, перевіряють перед розміткою і різкою на хвилястість і на прогин, і якщо ці показники не перевищують норм, листи направляють на розмітку і різання. Хвилястість і прогин листів усувають на листоправильних вальцах, що представляють собою машину з двох рядів горизонтальних валків, встановлених в шаховому порядку. Пластичний вигин в протилежних напрямках робить лист плоским. Заготовки для обичайок, призначені для вигину на листозгинальних вальцах, попередньої правки на листоправильних машинах, як правило, не беруть під.

Роздільна різка листів. Для полегшення операцій обробки листових заготовок листи великих розмірів розрізають попередньо на більш дрібні листи. Для різання листів з вуглецевих сталей найбільше поширена газокиснева (газова) різання (рис. 9.6). Для різання листів з високолегованих хромо-нікелевих і хромистих сталей цей спосіб не годиться, тому що утворюються на краях листа

при різанні тугоплавкі окисли хрому перешкоджають процесу різання. Хороша якість і високу продуктивність забезпечують методи киснево-флюсового і плазменно-дугового різання високолегованих сталей.



Мал. 9.6. Газове різання листової заготовки

Для різання листів застосовують також автоматичну електродугову різання. При цьому способі рез виходить з менш чистими крайками і утворюється більш глибока зона термічного впливу з несприятливо зміненої (крупнозернистою) структурою металу. Якщо через відсутність інших можливостей дугове різання неминуча, рекомендується видаляти метал з кромки різку на глибину не менше 5-7 мм.

Розмітка. Габаритні розміри листа повинні бути такими, щоб після розмітки розгорнення обичайки з необхідними припусками на обробку відходи металу були мінімальними. Коефіцієнт використання розкroюється листа пови-



нен складати близько 90%. Довжину розгорнутої обичайки визначають по нейтральному шару товщини стінки, тобто по середньому діаметру обичайки, так як при згинанні металу зовнішні шари подовжуються, а внутрішні коротшають. Для отримання якісних зварних з'єднань циліндричні частини корпусів апаратів іноді виготовляють, орієнтуючись на діаметр готової кришки або днища.

Різка. Механічну прямолінійну і криволінійне різання листів товщиною до 8 мм виробляють зазвичай роликовими ножицями з двома дисковими ножами. Прямолінійна різка листів більшої товщини проводиться на гільйотинних ножицях або на прес-ножицях (див. Рис 9.7). Газове різання, широко застосовуване при виготовленні теплообмінних апаратів, може здійснюватися вручну, напівавтоматично і автоматично. Ручна газове різання при серійному і масовому виробництві майже повністю витіснена газорізальними машинами-автоматами; широко використовується і плазменно-дугового метод різання металу. Магнітокопірвальні машини забезпечені плазмотроном-ножем, «вістрям» якого служить плазма. Плазмотроном можна різати всі метали, в тому числі і леговану сталь.



Рис. 9.7. Різка листа на гільйотинних ножицях

Різка сортової сталі (кола, квадрата, смуги), фасонних профілів і труб проводиться на прес-ножицях, приводними дисковими пилами з зубами, приводними ножівками або газовими різакми.

Обробка крайок під зварювання. Як поздовжні, так і кільцеві кромки обичайок, призначені для накладення зварного шва, обробляють для отримання поверхні необхідного профілю і чистоти. Обробка кромки здійснюється механічно або вогневим способом. Механічна обробка виконується на верстаках різних конструкцій: поздовжньо-стругальних, крайкостругальні, кромкообточних і фрезерних. Вогнева обробка кромки здійснюється тільки автоматичного газового або плазми-менно-дугового різкою і поєднується зазвичай з різкою листа.

Каток обичайок. Листи, призначені для вальцювання, не повинні мати розшарувань, тріщин і неметалевих включень. Листи невеликої товщини згинають в холодному стані. Листи товщиною більше  $1/40$  внутрішнього діаметра обичайки згинають на вальцях в гарячому стані, а після холодного згинання піддають відпалу для зняття залишкових напруг.

Перед вальцюванням листів в циліндр, корито або конус необхідно провести спеціальну операцію-підводку (подгибку) кромки, так як при вальцюванні листів в циліндр або конус краю їх на довжині 100-150 мм залишаються прямими, і при стикуванні таких решт поверхню судини отримує гострий злам на стику (рис. 9.8, а). Залежно від товщини листа підводку кромки виконують на Кромкозагинальні верстати (рис. 9.8, б), на згинальних вальцях (рис. 9.8, в) або вручну. Підводка крайок на аркушах товщиною понад 6 мм може бути виконана на листозгинальних вальцях за допомогою підкладних листів, вигнутих по відповідному радіусу (рис. 9.8, г). Підводка кромки листів проводиться на довжині  $a$ , що дорівнює половині відстані між осями двох нижніх валків листозгинальна машини.

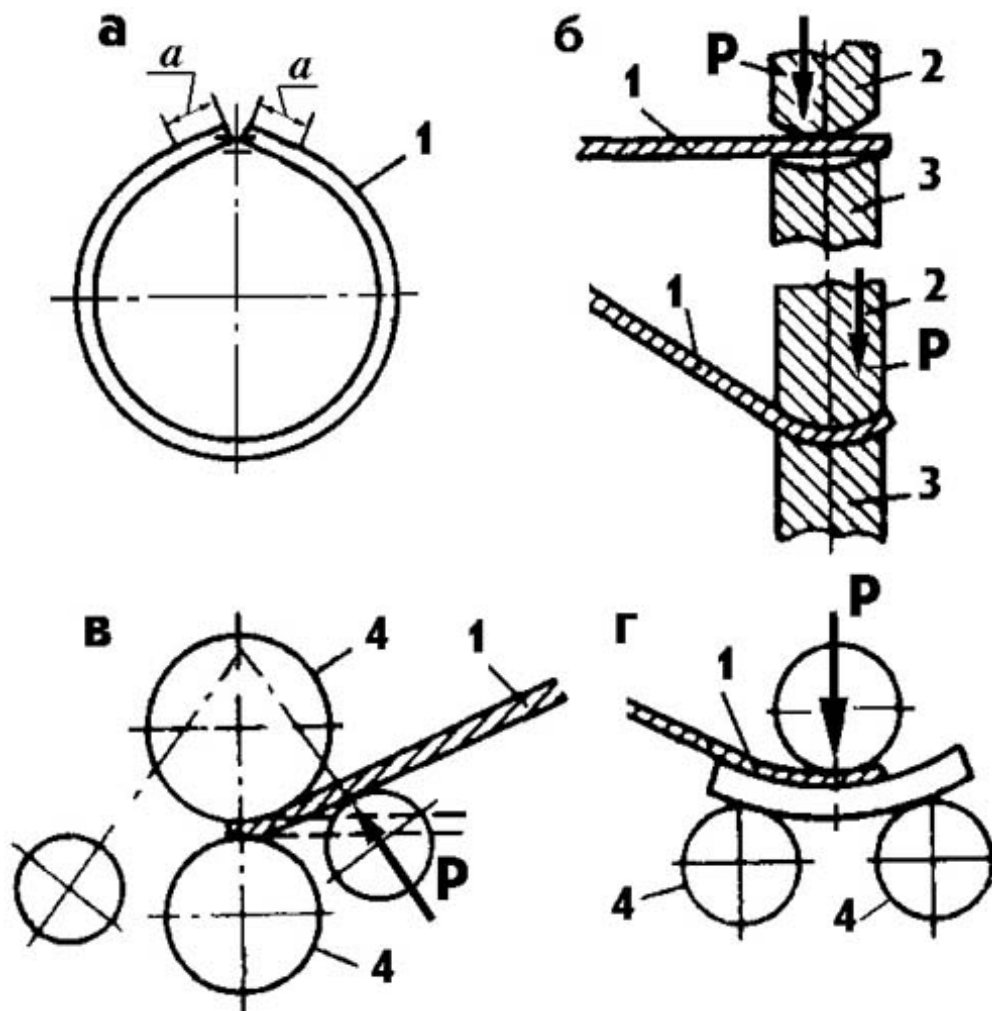


Рис. 9.8. Підводка крайок листа перед згинанням.

а- заготівля обичайки без підводки крайок, б -підводка крайок на Кромкозагинальні пресі, в -підводка крайок на згинальних вальцях, г-підводка крайок на листозгинальних вальцях з підкладним листом; 1-лист, 2-рухливий пуансон, 3-нерухома матриця, 4-нерухомі валки; Р-діюча сила

Після підведення крайок листи надходять на вальцевание для додання їм необхідної конфігурації. Каток проводиться на трьох-або подружжя-рехвалкових горизонтальних вальцах (рис. 9.9). Переміщення листа в тривалкових вальцах (рис. 9.9, б) в напрямку обертання нижніх провідних валків відбувається в результаті тертя листа про нижній валок під дією верхнього нажимного валка і викликано пружністю листа. Верхній валок обертається під дією тангенціальної сили від листа. У чотирехвалкових вальцах (рис. 9.9, в)

лист переміщається під дією обертання стискають його великих валків-верхнього і нижнього. Вигинається лист під дією малих бічних натискних валків. Вальцювання обичайки здійснюється в кілька зворотних (вперед-назад) проходів листа в валках до зіткнення кромки.

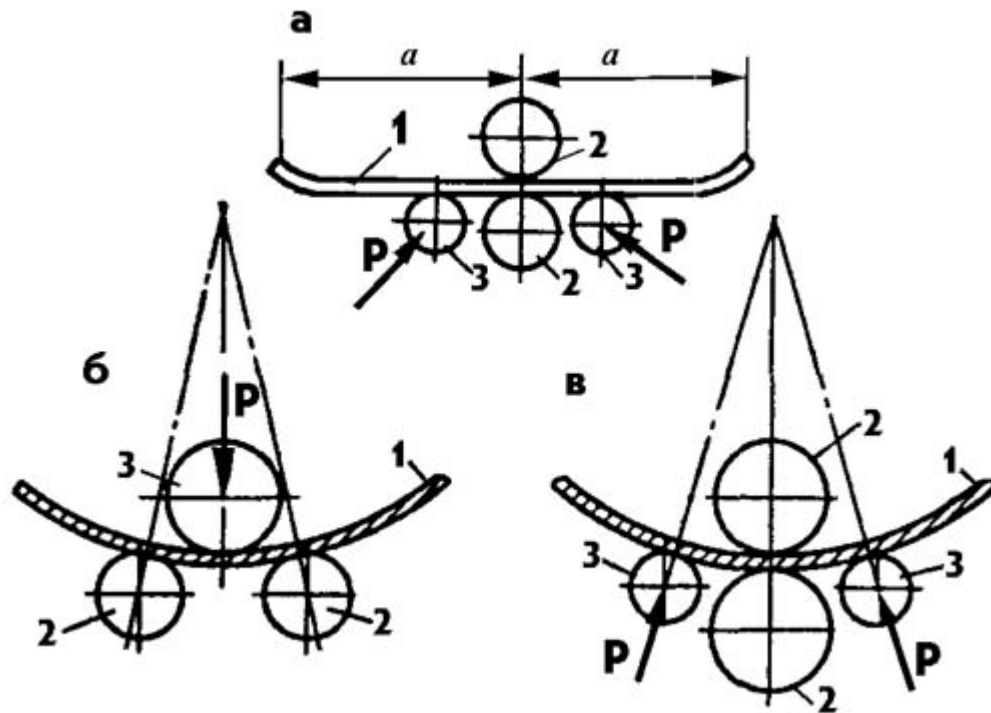


Рис. 9.9. Схема гнучкі аркушів на листозгинальних вальцях.

а- положення листа чиряк гнучкою, б-гнучка в тривалкових вальцах, в - Гнучкий в чотирехвалкових вальцах; г-чотирехвалкову вальці; 1-лист, 2-нерухомі валки, 3-рухливі валки; Р-діюча сила

При вальцюванні обичайок можливі наступні дефекти: перекіс крайок, перегин на радіус менше заданого, конусність, овальність і бочкообразність.

Складання і зварювання поздовжніх стиків. Збірка поздовжніх стиків після вальцювання листів проводиться на спеціальних складальних стендах. Збірка циліндричної частини обичайки або корит полягає в поєднанні поздовжніх крайок відповідно до технічних вимог до стиків під зварювання і в прихватки цих крайок за допомогою зварки в декількох місцях (з довжиною шва в 10-40 мм через кожні 200-400 мм). Зазвичай при складанні застосовують натяжні (рис. 9.10) і кантовательні пристосування (рис. 9.11). Зсув поздовжніх кромки листів однакової товщини не повинна перевищувати 10% товщини стінки, але не більше 3 мм. Овальність підготовленої до зварювання обичайки в будь-якому поперечному перерізі не повинна перевищувати 1% номінального діаметра.

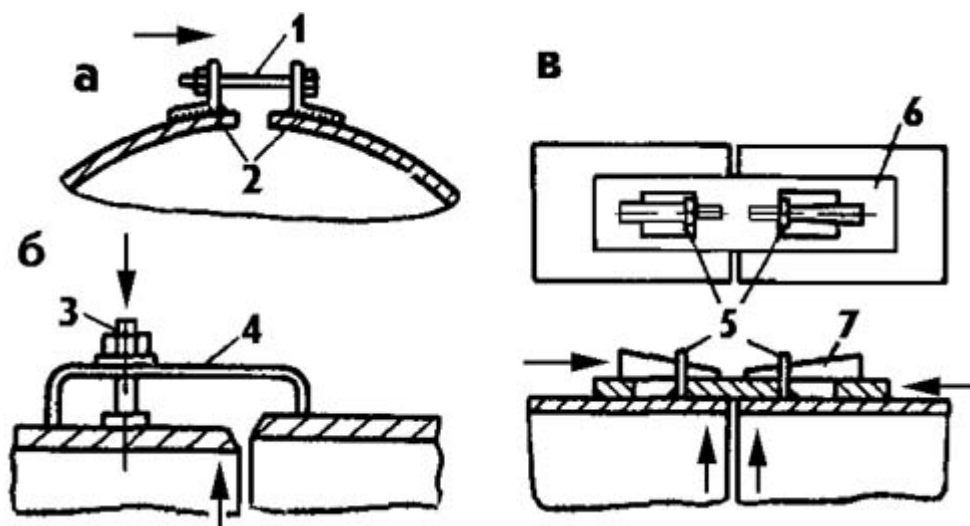


Рис. 9.10. Натяжні пристосування для підготовки обичайки під зварювання.

а - приварені косинці з натяжним болтом, б-приварені болт з натяжна скобою, в -приварені вушка з натяжними клинами; 1-натяжна болт, 2-косинці, 3-

болт, 4-натяжна скоба, 5-вушка, 6-плита, 7-натяжні клини

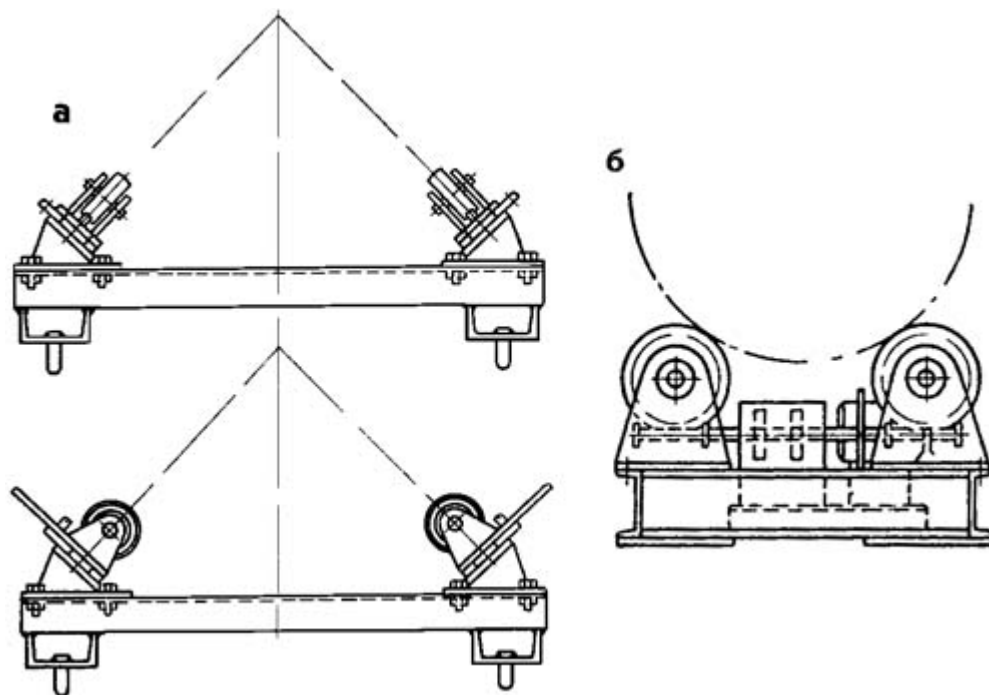




Рис. 9.11. Роликові кантователи для складання і зварювання циліндричних обичайок.

а-універсальний ручний кантувач для поздовжнього переміщення і для обертання обичайки, б-кантувач з електроприводом, в-підігрівач мережевої води, встановлений на кантувачах з електроприводом

Після точного встановлення крайок і прихватки ручним електродуговим зварюванням заготівля подається на автоматичну електродугове зварювання.

Складання і зварювання кільцевих стиків. На корпусах апаратів, циліндрична частина яких складається з декількох обичайок, кільцеві стики утворюються при складанні обичайок між собою і при складанні циліндричної частини з кришками і днищами. Збірка під зварювання кільцевих стиків аналогічна збірці поздовжніх стиків.

При виконанні зварювальних стиків між елементами різної товщини необхідно передбачати плавний перехід від одного елемента до іншого шляхом поступового стоншення більш товстого елемента на довжині, рівною або більшою, ніж величина чотирикратної різниці товщини елементів, що стикаються. При різниці товщини елементів, що сполучаються не більше 5 мм і товщині листа не менше 10 мм допускаються стикові шви без попереднього стоншення товстої стінки, при цьому конфігурація швів повинна забезпечувати плавний перехід від товстого листа до тонкого.

Перекіс поздовжніх осей з'єднаних обичайок допускається не більше 2 мм на 1 м довжини. Слід мати на увазі, що кільцеве стикування значно складніше поздовжнього, так як практично завжди є певна різниця діаметрів обичайок і деяка їх овальність.

Вирізка отворів. Для установки на апараті штуцерів, бобишек і гільз, а також спеціальних люків, в готових зварених кожухах вирізують отвори по розмітці, виконаної на розгортці кожуха. Отвори невеликого діаметра викону-



ють на повний діаметр свердлом або фрезою. Отвори великих діаметрів рас-сверливают з попередньої центровкой малого діаметра (14-16 мм). При неможливості вирізання отворів свердлами і фрезами застосовують пристосування з закріпленими в ньому двома різцями, встановленими на відстані, рівному діаметру отвору один від іншого. Великі отвори в листах вирізають газової або плазмово-дугового різкою з подальшим очищенням кромek абразивним кругом.

Після свердління і обробки отвору в корпусі очищають від задирок з зовнішньої і внутрішньої сторін за допомогою пневматичних шліфувально-зачисних інструментів.

Корпуси багатокутної форми (наприклад, конденсаторів парових турбін) виготовляються зварюванням плоских сталевих листів на рамі з основних поздовжніх несучих балок двотаврового перетину і декількох поперечних балок. Одночасно з виготовленням корпусу в нього вваривать проміжні перегородки та основні трубні дошки. Для додання жорсткості і міцності корпус по зовнішній стороні може бути посилений приварними ребрами з листової або профільної сталі. Основні вимоги до підготовки і виготовлення коробчатих корпусів відповідають викладеним вище положенням, використовуваним при виготовленні циліндричних корпусів.

### **Виготовлення фланців**

Фланцеві з'єднання повинні бути міцними і забезпечувати герметичність з'єднання. Типи і розміри фланців стандартизовані і підбирають по ГОСТ. Вибір типу фланцевого з'єднання (див. Рис. 8.8) залежить від умов роботи апарату, тиску, агресивності теплоносія, умов монтажу і технологічних можливостей виготовлення фланців і проводиться при проектуванні.

У зварних апаратах низького тиску (до 1,6 МПа) фланці виготовляються з листового, смугового, фасонного прокату або лиття з наступною механічною

обробкою. В апаратах з робочим тиском до 10 МПа застосовують фланці посиленого типу, в яких на поверхнях ущільнення є виступи і западини або шипи і пази, причому такі фланці виготовляються з відповідних фасонних поковок шляхом штампування і механічної обробки. Фланці невеликого діаметра виготовляють зазвичай з листової сталі, фланці діаметром понад 200 мм - із смугового прокату шляхом гнуття в гарячому стані, що є більш економічним, ніж використання фасонних поковок.

За формою фланці найчастіше застосовуються круглі, але для деяких типів теплообмінних апаратів використовуються фланці багатокутної або більш складної форми (наприклад, у конденсаторів парових турбін).

Чистоту обробки і форму ущільнювальної поверхні фланців встановлюють при проектуванні; вони залежать від параметрів робочого середовища.

При установці фланців на корпус або водяну камеру апарату (див. Рис 9.15) перевіряють їх перпендикулярність до осі корпусу по зовнішнім крайках оброблених поверхонь. Допускаються такі відхилення перпендикулярності площини фланців щодо осі апарату:

Діаметр фланця, мм до 500 500-1500 1500-2000 більше 2000

Допустиме відхилення, мм 1 1,5 2 3





Рис. 9.15. Плоскі приварні фланці.

а-фланці патрубків підведення і відведення води, б-фланець для з'єднання камери з корпусом апарату

З'єднання двох і більше фланців між собою здійснюється болтами або шпильками, кількість і розміри яких визначаються в результаті проектного прочностного розрахунку фланцевого з'єднання. Болти, шпильки і гайки для фланцевих з'єднань виготовляються з сортового прокату на токарно-гвинторізних верстатах. Між фланцями встановлюються ущільнювальні прокладки, тип яких вибирається при проектуванні апарату. Виготовляють прокладки вирубкою або штампуванням з листового матеріалу, в деяких випадках з шнура круглого або прямокутного перерізу або формують.

### **Виготовлення і збірка трубної системи апаратів**

Трубна система кожухотрубних теплообмінних апаратів складається з трубних дощок (решіток) і проміжних перегородок (поздовжніх чи поперечних), що утворюють каркас, в який встановлюються теплообмінні трубки.

Трубні дошки (рис. 9.18) виготовляють із сталевих листів або поковок, в особливих випадках-з інших металів і сплавів, перегородки-зі сталевих листів необхідної товщини. Відібрані за якістю і розмірами листи правлять на листо-правильних вальцах. На виправлених аркушах розмічають контури для вирізки трубної дошки і, якщо необхідно, -для обробки поверхні під фланець. Вирізку заготовок для трубних дощок і перегородок виробляють автоматичним та напівавтоматичним газової або плазмово-дугового різкою. Вирізані заготовки трубних дощок обробляють по торця і по площині, а заготовки перегородок-тільки по торця. При виготовленні трубної дошки для багатоходового (по внутрішньотрубної простору) теплообмінного апарату чистової обробки піддають або всю її по-поверхню з боку камери, що необхідно для герметичного з'єднання дошки з перегородкою камери, або під перегородками вибирається канавка для закладки ущільнювального матеріалу. Обробку трубних дощок роблять на карусельних, фрезерних і стругальних верстатах.

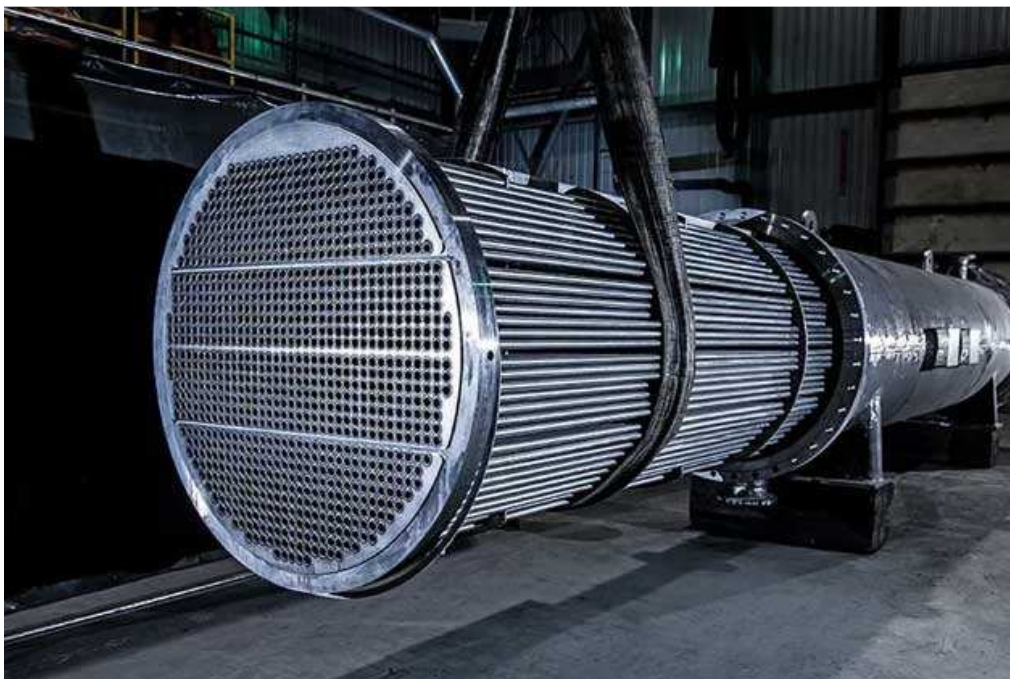


Рис. 9.18. Трубні дошки теплообмінних апаратів.

а-конденсатор, б-підігрівач низького тиску

Після зовнішньої обробки заготовку розмічають під свердління отворів для трубок, болтових з'єднань, анкерних і каркасних зв'язків. Для забезпечення співвісності отворів в трубних дошках і проміжних перегородках апарату отвори під трубки свердлять по кондуктору або пакетом, або на верстатах з числовим програмним управлінням за спеціальною програмою. При свердлінні пакетом розмічають одну заготовку, після чого дошки і перегородки збирають в пакет і стягують болтами. На радіально-свердлильному верстаті виробляють спочатку центрування (свердлом малого діаметра), а потім свердління і зенкування отворів інструментом необхідного діаметра.

Підготовлені трубні дошки та перегородки збирають в каркас, при цьому ретельно виставляють їх для забезпечення співвісності отворів під теплообмінні трубки, необхідної відстані між трубними дошками і перегородками, габаритних розмірів трубної системи, і з'єднують між собою за допомогою каркасних зв'язків (виготовлених зі сталевих труб або сортового і фасонного прокату) зварюванням або болтами. У деяких конструкціях як каркасних зв'язків використовують стяжки (довгі шпильки з різьбленням на кінцях), якими через дистанційні втулки стягуються елементи каркаса. На спеціалізованих підприємствах зварювання каркасів трубних систем виробляють в спеціальних пристроях-складальних кондукторів. У ряді конструкцій одну або обидві трубні дошки до або після набирання теплообмінних трубок приварюють до обечайке апарату.

Заготівля трубок. Трубки з певного, раніше обраного матеріалу відбирають по діаметру, довжині і якості. Потім трубки вибірково відчують-за кілька штук з кожної партії на розтягнення, на роздачу, на загин, тобто на відсутність зламів і тріщин при загині під певним кутом, що залежать від матеріалу, розмірів і товщини стінки трубок, а також на внутрішній тиск-відповідно до ГОСТ і на відсутність остаточних напружень. Для складання U-образних трубних систем апаратів (рис. 9.18, б) трубки згинають по шаблонах на трубогибочні верстатах.

Опори або лапи, якими теплообмінні апарати кріпляться до фундаменту або спираються на спеціальні конструкції, можуть бути різних типів і розмірів в залежності від конструкції, маси і габаритів апарату (див. Рис. 8.18, 8.19). Деталі опор виготовляють з фасонного прокату і з'єднують між собою зварюванням або болтами. У деяких випадках опори виготовляють литими зі сталі або чавуну (іноді заодно з корпусом). Підшви лап і опор обробляють для отримання поверхні необхідної площинності і чистоти, потім в них виконують отвори (круглої або овальної форми) під кріпильні болти. Опори або лапи кріпляться до апарату зварюванням або болтами, як правило, через підкладні листи, приварені до корпусу. Конструкція, матеріал лап і опор, а також місце і спосіб їх кріплення до корпусу регламентується нормативно-технічною документацією і визначається при проектуванні апарату. На рис 9.17 показаний підігрівач мережевої води, встановлений на дві сідлові опори.

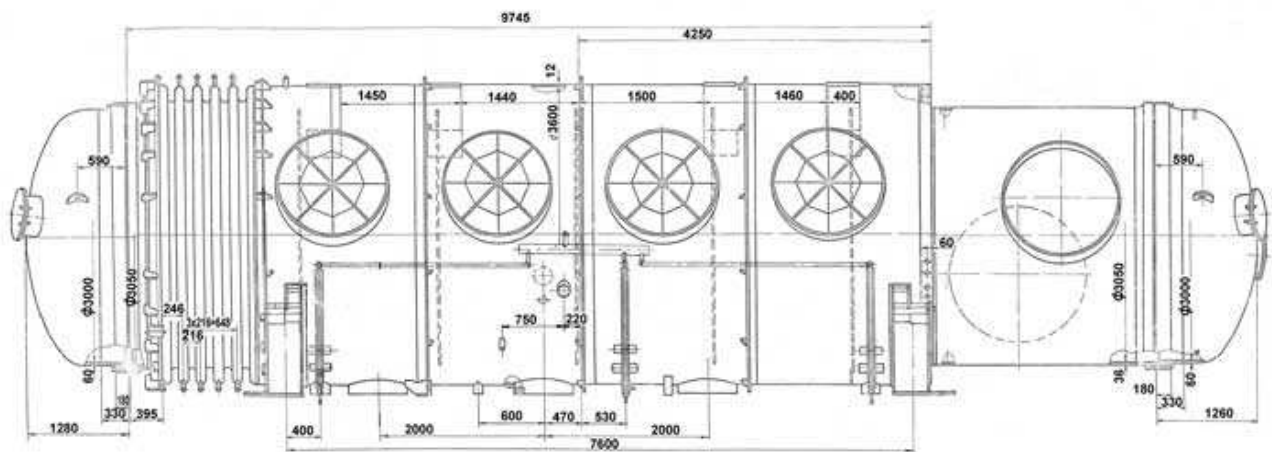




Рис. 9.17. Горизонтальний підігрівач мережевої води на сідлових опорах



## 7. Ремонт та монтаж

Найбільш поширеними наслідками відмов теплообмінних апаратів ПТУ є відключення турбіни, обмеження відпуску тепла, зниження коефіцієнта готовності обладнання, зниження економічності турбоустановки і, як наслідок, збільшення питомих витрат палива. У зв'язку з цим велике значення має оперативне усунення несправностей апаратів і профілактика відмов, які виробляються в системі технічного обслуговування і ремонту.

Здатність обладнання до ефективної роботи згідно з вимогами нормативно-технічної документації протягом всього терміну експлуатації залежить від якості технічного обслуговування і ремонту по кожному вузлу обладнання.

Наведемо визначення деяких понять, які використовуються в цій главі [19].

Система технічного обслуговування та ремонту обладнання сукупність взаємопов'язаних елементів, документації і виконавців, необхідних для підтримки і відновлення якості обладнання станцій і мереж, що входить в цю систему.

Технічне обслуговування-комплекс операцій по підтримці працездатності здатності або справності виробу під час використання його за призначенням-ню, очікуванні, зберіганні і транспортуванні (ГОСТ 18322-78).

Ремонт-комплекс операцій з відновлення справності або працездатності здатності виробів і відновлення ресурсів виробів і їх складових частин (ГОСТ 18322-78).

Ремонтопридатність-властивість об'єкта, що полягає в пристосованості до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту (ГОСТ 27.002-89).

Система технічного обслуговування та ремонту обладнання в загальному випадку включає в себе:

- технічне обслуговування обладнання;
- накопичення і вивчення досвіду експлуатації і ремонту, встановлення оптимальної періодичності і тривалості проведення капіталь-них, середніх і поточних ремонтів;
- впровадження прогресивних форм організації та управління ремонтом із застосуванням обчислювальної техніки;
- впровадження передових методів ремонту, комплексної механізації і прогресивної технології;
- модернізація обладнання;
- широке впровадження спеціалізації ремонтних робіт;
- контроль якості виконуваних робіт в процесі ремонту і контроль якості відремонтованого обладнання;
- своєчасне забезпечення ремонтних робіт матеріалами, запчастинами та комплектуючими обладнанням;
- аналіз параметрів технічного стану обладнання до і після ремонту за результатами випробувань.

Технічне обслуговування та ремонт передбачають виконання когось плекса робіт, спрямованих на забезпечення справного стану обладнання, надійної та економічної його експлуатації, що проводяться з певною періодичністю і послідовністю при оптимальних трудових і матеріальних витратах.

Модернізація діючого обладнання (модернізація) - зміна конструкції діючого обладнання, що забезпечує поліпшення його показників призначення, підвищення надійності, зменшення енергетичних, матеріальних витрат і трудових ресурсів при експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті, а також можливості застосування при експлуатації більш дешевих (недефіцитних) видів палива, сировини, матеріалів.

До основних видів робіт, які проводяться на станціях для відновлення працездатності теплообмінних апаратів, відносяться очищення і антикорозійна обробка трубних дощок і водяних камер; очищення внутрішньої і зовнішньої поверхонь теплообмінних трубок; відновлення герметичності з'єднань трубок з трубними дошками; заглушка поламаних трубок, а також їх заміна при капітальних ремонтах апаратів. Ресурс між капітальними ремонтами повинен бути не менше 40 000 год.

### **Пошкоджуваність теплообмінних апаратів**

Пошкоджуваність теплообмінних апаратів викликається наступними основними процесами, що мають місце при експлуатації.

Хімічні процеси:

- загальна корозія (в присутності окислювачів);
- ударна корозія;
- корозія під впливом агресивних газів і розчинних речовин (углекислотна, аміачна та ін.);
- корозія під впливом мікроорганізмів (біологічна корозія);
- електрохімічна корозія;

- корозійне розтріскування під напругою.

Механічні процеси, пов'язані з ерозією:

- ерозія теплоносієм з механічними суспензіями у внутрішньотрубно́ї просторі (в більшій мірі характерна для конденсаторів);
- ерозія крапельно-ударна в міжтрубному просторі (характерна для конденсаторів і ПСГ, а також для сальникового підігрівача);
- ерозія в результаті впливу щодо високошвидкісних і високотемпературних потоків рідини (характерна для ПВД).

Механічні процеси, пов'язані з вібрацією:

- фрикційний знос трубок в серединах прольотів або в області згинів при їх зіткненнях, а також в зоні проходження через отвори в проміжних перегородках за рахунок вібрації трубок в потоці теплоносія.

Термічні процеси:

- перегрів металу трубок вище допустимого, викликаний, наприклад, несправністю засувки по пару при припиненні прокачування нагрівається теплоносія, а також порушенням правил технічної експлуатації (ПТЕ);
- скрутність термічних розширень теплообмінних трубок і як наслідок поява в матеріалі додаткових напружень.

Усі зазначені процеси можуть посилюватися дефектами виготовлення, монтажу та експлуатації, такими як механічні пошкодження (задираки, подряпини і т.д.) на зовнішній поверхні металу трубок при складанні, пошкодження теплообмінних трубок за рахунок попадання в паровий простір апаратів різних

сторонніх предметів (фрагменти відірваних лопаток- в конденсаторі), а також виникненням в трубках при вальцюванні напруг крутіня.

Результати аналізу відмов обладнання електростанцій, виконаного за 20-річний період, за даними [69], дозволяють зробити висновок, що в рік відбувається від 150 до 330 відмов у роботі конденсаторів та іншого допоміжного теплообмінного обладнання, з них від 35 до 60% відмов призводять до останову турбін. Серед теплообмінного обладнання турбоустановок найбільший ступінь впливу на роботу ПТУ мають відмови конденсаторів. За нею йдуть ПВД, сальникові підігрівачі і ПНД.

Розглянемо окремо за елементами, що входять до групи теплообмінного обладнання, частку відмов, що припадають на конкретний елемент, і основні причини, що викликають відмову.

Конденсатори. Частка відмов конденсаційної установки в загальному кількостю-стве відмов складає в середньому 15, а вимушені простої турбін - 12% від сумарної тривалості простоїв парку турбін [69]. Хоча в середньому частота відмов конденсаційних установок займає друге-третє місце, на ряді електростанцій їх відмови трапляються значно частіше. Основними причинами відмов є несвоєчасна заміна і очищення конденсаторних трубок; розриви трубок через наявність в них технологічних дефектів; старіння металу трубок при тривалій експлуатації; утворення тріщин на трубках, а також неякісна вальцювання трубок на заводі; наявність значних залишкових напружень, не знятих при відпалі трубок; обесцінкованія матеріалу трубок при використанні латуні Л68; ерозійний знос трубок; розриви водяний камери конденсатора.

Підігрівачі високого тиску. Надійність ПВД визначається наявністю конструктивних недоліків: локальними високими швидкостями води в змеевиках, що приводять до їх ерозійного зносу; незадовільною конструкцією діафрагм в колекторах; жорстким кріпленням колекторів з різною температурою

теплоносія; незадовільною конструкцією ущільнень фланцевих роз'ємів ПВД, порушенням герметичності трубної системи внаслідок вичерпання ресурсу металу змійовиків. Найбільш частими ушкодженнями ПВД є дефекти ремонту: неякісна зварювання кутових швів або ущільнювальної мембрани, течі по фланцевим роз'ємі внаслідок поганої їх обтягування.

Підігрівачі низького тиску. Основними причинами відмов у роботі ПНД є вібраційні поломки (фрикційний знос трубок в зоні проходження їх через отвори в проміжних перегородках; втомний злам трубок у трубних дощок; фрикційний знос трубок в середині великих прольотів і П-образних вигинів за рахунок ударів і тертя сусідніх трубок один про одного і ін.), ерозійно-корозійні руйнування вхідних ділянок трубок; ослаблення герметичності вальцьованих з'єднань; порушення в роботі регуляторів рівня та воздухоотсасиваючих пристроїв.

Мережеві підігрівачі. Відмови в роботі горизонтальних мережевих підігрівачів відбуваються в основному через дефекти вальцювання трубних пучків, а також з-за корозійно-ерозійних пошкоджень трубних систем. Для вертикальних мережевих підігрівачів найбільш характерні пошкодження, що виникають в результаті вібрації трубних систем.

### **Класифікація видів ремонту**

Класифікацію ремонту проводять по одному з наступних розмежувальних ознак: плановані, періодичності проведення, обсягом проведених робіт, ступеня регламентації робіт і т.д.

Різні види ремонту можна проводити за допомогою різних методів, т. Е. Сукупності технологічних і організаційних правил виконання ремонтних операцій. Класифікація видів ремонту за деякими розмежувальними ознаками представлена на рис. 11.1.

У практиці розрізняють наступні види ремонту (згідно ГОСТ 18322-78).

Плановий - ремонт, постановка обладнання на який здійснюється відповідно до вимог нормативно-технічної документації.

Неплановий (аварійний) - ремонт, постановка на який здійснюється без попереднього призначення, проводиться при раптовому відмову апарату.

Поточний - ремонт, що виконується для забезпечення або відновлення працездатності виробу і полягає в заміні і (або) відновленні від-ділових частин.

Капітальний - ремонт, що виконується для відновлення справності та повного (або близького до повного) відновлення ресурсу виробу із заміною чи відновленням будь-яких його частин, включаючи базові.

Знеособлений (агрегатний) - метод ремонту, при якому несправні агрегати замінюються новими або заздалегідь відремонтованими. Під агрегатом розуміється складальна одиниця, що володіє властивостями повної взаємозамінності, незалежної збірки і самостійного виконання певної функції у виробках різного призначення.

Ремонт з технічного состоянію- метод ремонту, при якому перелік операцій визначається за результатами контролю технічного стану і діагностування обладнання.



Рис. 11.1. Класифікація видів ремонту

Розглянемо зміст перерахованих вище видів ремонту.

Плановий ремонт обладнання заснований на вивченні і аналізі ресурсів роботи деталей і вузлів з встановленням технічно і економічно обґрунтованих норм і нормативів. Плановий ремонт передбачає виведення в ремонт обладнання з урахуванням вимог діючих в галузі нормативів.

У плановому порядку виконуються капітальний, середній і поточний ремонти. Вид ремонту допоміжного (теплообмінного) обладнання може відрізнитися від виду ремонту основного обладнання, але виконується в строки,



що визначаються ремонтом основного устаткування.

Планування ремонту обладнання включає в себе розробку перспективних графіків ремонту і модернізації основного обладнання станцій (електричних і компресорних); річних графіків ремонту основного обладнання станцій; річних і місячних графіків ремонту допоміжного і загальностанційного обладнання.

Перспективний графік ремонту і модернізації основного обладнання станцій зазвичай розробляється на 5 років на підставі відомостей, що подаються станціями, і служить підставою для планування трудових, матеріальних і фінансових ресурсів по роках планованого періоду. Перспективний графік ремонту може щорічно коригуватися з урахуванням обстановки, що склалася або виниклих потреб.

Річний графік ремонту основного обладнання, як правило, встановлює календарний час виведення в ремонт кожної турбоустановки (енергоблоку), тривалість ремонту і планований обсяг робіт за виконавцями. Річний графік розробляється на планований рік відповідно до затвердженого перспективним графіком з урахуванням технічного стану обладнання. При цьому в річний графік можуть бути внесені обґрунтовані зміни позицій перспективного графіка.

Поточний ремонт теплообмінних апаратів виробляють для контролю і підтримки обладнання в працездатному стані. Він повинен проводитися на зупиненому обладнанні. Основні операції, що виконуються при поточному ремонті теплообмінних апаратів, включають в себе:

- зовнішній огляд апарату з виправленням зовнішніх дефектів ізоляції, заміною болтів і шпильок, підтяжкою болтових і різьбових з'єднань;
- перевірку стану арматури і заміну або ремонт її;

- огляд і налагодження контрольно-вимірювальної апаратури;
- перевірку і налагодження конденсатоотводчиків і дренажів;
- огляд і оцінку стану внутрішніх поверхонь апарату.

Капітальний ремонт має на меті відновлення працездатності обладнання по можливості до початкового технічного стану. При капітальному ремонті проводиться повне розбирання апарату з ремонтом окремих деталей і вузлів на місці, в ремонтних цехах або підприємствах. Капітальний ремонт проводиться за спеціально розробленим планом і забезпечується необхідними документами і матеріалами (дефектними відомостями, кресленнями, запасними частинами, інструментами, пристосуваннями, підйомно-транспортним та такелажним обладнанням), а також робочою силою і ремонтної майданчиком. При капітальному ремонті може бути проведена заміна трубного пучка або всього теплообмінного апарату.

Послідовність операцій при капітальному ремонті:

1. ознайомлення з кресленнями і дефектною відомістю на апарат; підготовка необхідних запасних деталей, інструменту, матеріалів і підйомно-транспортних пристроїв;
2. отримання дозволу на відключення обладнання, що підлягає ремонту;
3. зняття контрольно-вимірювальних приладів, розтин апарату і розбирання його на вузли і деталі;
4. промивання очищення;
5. відбраковування деталей методом огляду і вимірів, уточнення дефектної відомості на ремонт і відомості на запасні частини;
6. ремонт деталей, складання вузлів, підгонка деталей і вузлів;

7. виготовлення нових деталей і вузлів, внесення удосконалень, намічених до реалізації в період капітального ремонту;

8. збірка, випробування апарату і усунення виявлених дефектів;

9. перевірка апарату після складання, підготовка до випробування;

10. випробування апарату і здача його в експлуатацію.

Завершується виконання капітального ремонту складанням акту про передачу обладнання в експлуатацію.

Знеособлений метод ремонту використовується в тому випадку, коли не зберігається приналежність відновлених елементів та вузлів певного теплообмінних апаратів. Цей метод може застосовуватися, якщо на станції встановлено кілька однотипних теплообмінних апаратів. При цьому методи скорочується час ремонту, роботи можуть бути повніше спеціалізовані, підвищується продуктивність праці.

### **Основні етапи ремонту**

В силу нерівномірного зносу і випадкового характеру пошкоджень і відмов теплообмінного обладнання зазвичай потрібне відновлення або заміна тільки деякої частини вузлів і деталей. Так найбільш пошкоджує вузлом (складальної одиницею) теплообмінного апарату є трубна система і, зокрема, теплообмінні трубки. Внаслідок цього матеріальні витрати на виконання ремонту, як правило, менше ніж на виготовлення нового обладнання.

### **Структурні схеми проведення ремонту**

Технологічний процес ремонту визначається, перш за все, стратегією ремонту, тобто сукупністю правил управління технічним станом обладнання. В даний час реалізуються дві основні стратегії ремонту-з напрацювання і за

технічним станом.

Під стратегією ремонту з напрацювання розуміється стратегія, згідно з якою обсяг ремонту обладнання і його складових частин призначається однако-вим для однотипного устаткування в залежності від часу напрацювання з по-чатку експлуатації або після капітального і середнього ремонту апарату, а перелік операцій відновлення визначається з урахуванням результатів дефектації складових частин обладнання . Фізичним обґрунтуванням доцільності проведення такого періодичного ремонту є погіршення з часом ос-новних параметрів, що визначають працездатність обладнання (старіння, знос і т. П.). Реалізація стратегії ремонту з напрацювання означає, що обладнання, яке надходить в ремонт, незалежно від його фактичного технічного стану піддається ремонту в обсязі, передбаченому наперед заданим переліком обов'язкових робіт.

Типова структурна схема технологічного процесу, що характеризує середній і капітальний ремонти теплообмінного устаткування з напрацювання, представлена на рис. 11.3. У загальному випадку схема містить 8 основних операцій, частина яких при середньому ремонті буде відсутній.



Рис. 11.3. Схема технологічного процесу, відповідного стратегії ремонту з напрацювання

Приймання апарату в ремонт (етап 1 на рис. 11.3) включає в себе оформлення відповідної документації, перевірку комплектності загального технічного стану і оцінку напрацювання з початку експлуатації або після останнього ремонту.

Розбирання (етап 2) проводиться до рівня, що дозволяє виконати як обов'язкові роботи, обумовлені в їх переліку, так і необхідні доразбирання за чинною нормативно-технічною документацією. Згаданий рівень визначається конструктивними особливостями теплообмінного апарату.

Після розбирання теплообмінного апарату його трубна система надходить на очистку та промивку (етап 3). Операції цього етапу виконуються на відокремленій ділянці. Залежно від ступеня і характеру забруднень очищення проводиться різними способами, перерахованими в відповідному розділі.

Після очищення проводиться дефектація (етап 4), метою якої є виявлення несправностей (обриви трубок, тріщини, знос і т. Д.). У процесі ремонту з метою поглибленої оцінки технічного стану може застосовуватися інструментальна дефектація за допомогою засобів неруйнівного контролю металу елементів конструкції на наявність тріщин, раковин і т. П. Виявлені дефекти заносяться у відомість дефектації.

Власне ремонт (відновлення) включає в себе етапи 5 і 6: виконання обов'язкових робіт, обумовлених у технології ремонту даного апарату, і усунення дефектів згідно з відомістю дефектації.

Після ремонту здійснюється складання апарату (етап 7) і включення його в технологічну схему. Остаточними етапами ремонту є приймання в експлуатацію (етап 8) і проведення випробувань апарату (етап 9) з метою визначення його характеристик і оцінки якості ремонту.

Стратегія ремонту з напрацювання застосовується не тільки через наявність природних процесів зносу і старіння теплообмінного обладнання, а й з-за відсутності доступних методів контролю його технічного стану. Оцінка параметрів технічного стану апарату (див. Гл. 11) можлива як в умовах експлуатації, так і під час проведення ремонту теплообмінного апарату. У міру підвищення надійності теплообмінних апаратів, вдосконалення методів контролю та аналізу діагностичної інформації необхідність в їх розбиранні для перевірки технічного стану поступово зменшуватиметься.

Підвищення загального технічного рівня конструювання, вдосконалення технології виготовлення, застосування нових більш надійних матеріалів, реалізація моніторингу технічного стану апаратів з використанням засобів діагностування, що забезпечують виявлення відмов і несправностей, в тому числі і без розбирання обладнання, значне розширення можливостей систем контролю-все це створює умови для переходу до ремонту за технічним станом.

Реалізація стратегії ремонту за технічним станом (РТС) приводить до скорочення витрат на ремонт, що визначається зменшенням обсягу ремонту або збільшенням міжремонтного періоду.

При ремонті теплообмінних апаратів за технічним станом обсяг робіт визначається за результатами оцінки параметрів стану. Одним з методів контролю стану обладнання є діагностика несправностей (див. Гл. 12). На відміну від стратегії ремонту з напрацювання перелік робіт при РТС містить вказівку на перелік параметрів стану, які необхідно діагностувати (наприклад, необхідно оцінити залишкову товщину стінки трубок конденсатора і характер корозійних пошкоджень для прийняття рішення про заміну трубок). Обсяг же власне ремонту (розбирання та відновлення) залежить від результатів отриманої оцінки технічного стану надійшов в ремонт обладнання. Необхідно відзначити, що, як зазначалося вище, середній і капітальні ремонти теплообмінних апаратів, як правило, пов'язані з ремонтом турбоустановки.

Ремонт за технічним станом заснований на тому, що для конкретного теплообмінного апарату проводяться тільки ті роботи, які необхідні для підтримки високого рівня його ефективності і надійності в процесі експлуатації. Ремонтні роботи, не обумовлені фактичним станом обладнання, особливо разборочно-складальні, не проводяться, так як це може тільки погіршити технічний стан за рахунок дефектів, внесених при ремонті.

На рис. 11.4 наведена схема типового технологічного процесу ремонту обладнання, відповідного стратегії РТС.

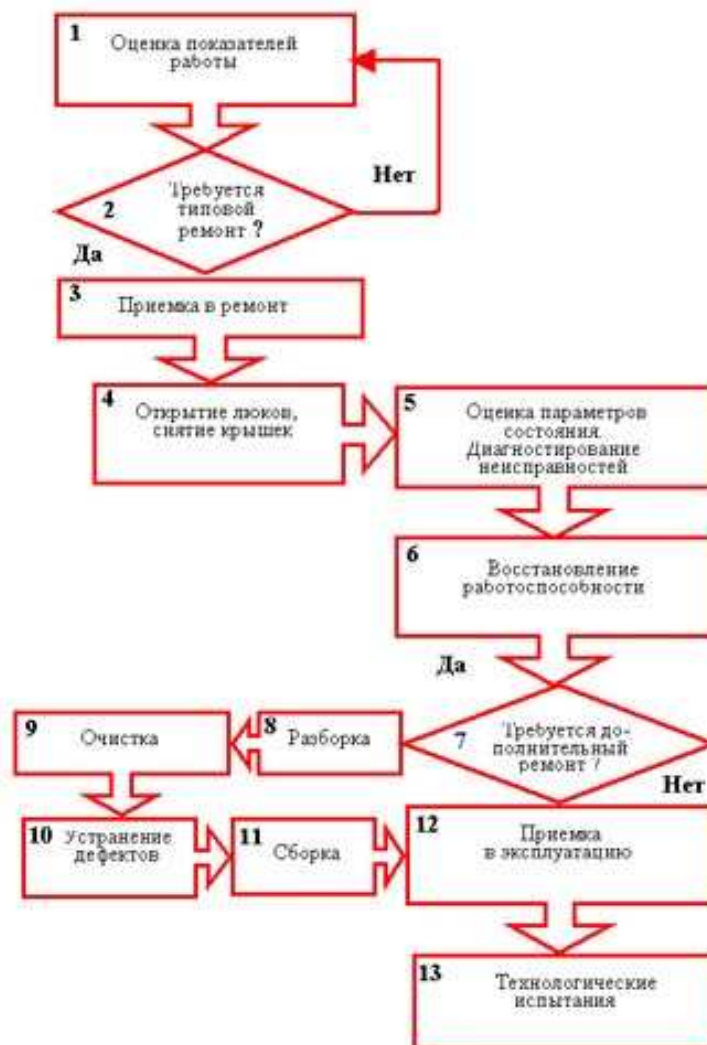


Рис. 11.4. Схема технологічного процесу, відповідного стратегії ремонту за технічним станом

Розглянемо технологічний процес по етапах.

В процесі експлуатації регулярно проводиться оцінка показників роботи теплообмінного обладнання (етап 1), на підставі якої визначається вид його технічного стану (працездатне, робочий, позаробочий і т.д.). У разі невідповідності показників вимогам нормативно-технічної документації може бути прийнято рішення про виведення обладнання в ремонт (етап 2).

Одним з основних етапів ремонту по стратегії РТС є оцінка параметрів стану і діагностування несправностей (етап 5). На цьому етапі проводиться огляд елементів теплообмінного апарату і, при наявності відповідної діагностичної апаратури, оцінка параметрів його технічного стану, за результатами чого приймається рішення про необхідність і обсязі ремонтних робіт з фіксуванням їх у відомості дефектації. У цю відомість заносяться виявлені (візуально і за допомогою приладів) дефекти, після чого приймається рішення про ремонт обладнання.

У процесі діагностування проводиться усунення невеликих дефектів, що впливають на працездатність апаратів (етап 6). Якщо несправності, що підлягають усуненню, в процесі діагностування не встановлені, то усуваються тільки ті дефекти, які призвели або можуть призвести при експлуатації апарату до зниження ефективності і надійності його роботи. В цьому випадку теплообмінний апарат не виводиться в ремонт, а готується до прийняття в експлуатацію (етап 12).

Якщо діагностування показало необхідність проведення ремонту, то теплообмінний апарат розбирають (етап 8) і реалізують ця-пи очищення (етап 9), усунення дефектів (етап 10) і збірки (етап 11), аналогічні відповідним етапам стратегії ремонту з напрацювання (див. Рис . 11.3).

На заключному етапі після приймання теплообмінного апарату проводять випробування (етап 13) силами експлуатаційного персоналу для оцінки



показників роботи і якості ремонту.

### **7.5 Типові роботи при ремонті теплообмінних апаратів**

Розглянемо основні типові операції по ремонту на прикладі теплооб-сних апаратів ПТУ. Ремонт теплообмінних апаратів ГТУ в основних моментах проводиться аналогічним чином. При ремонті кожухотрубних теплообмінних апаратів ПТУ проводяться такі типові роботи [73]:

- розбирання, збірка;
- ремонт водяних камер, каркаса трубного пучка;
- очищення трубних дощок, трубок, міжтрубному простору;
- заміна трубок, включаючи їх вирізку, установку нових трубок, закріплення трубок в трубних дошках;
- перевірка герметичності.

При виконанні цих робіт можуть виконуватися такі технологічні операції:

- електрогазосваркі;
- електрогазорезка;
- механічна обробка;
- вальцевание і ін.

#### **7.5.1 Розбирання апарату. Ремонт камер і каркаса трубного пучка**

При розбиранні теплообмінних апаратів виконують такі роботи: зняття кришок, водяних камер; виїмку трубної системи (для вертикальних підігрівачів мережної води, ПНД, маслоохладителей) [73].

Для зняття і ремонту верхньої водяний камери (наприклад, підігрівача мережної води) необхідно провести ряд операцій. В першу чергу слід від'єднати коліна трубопроводів підведення і відведення мережної води, потім відвернути ковпачкові гайки анкерних зв'язків і разболтіть горизонтальний роз'єм, ввернути віджимні болти, Застропіть і зняти водяну камеру, причому необхідно кантовать її горизонтальним роз'ємом вгору. Далі слід зачистити ущільнювальні пояски роз'єму, виготовити і прографітіть прокладки на горизонтальному роз'ємі камери і патрубках підведення-відведення мережної води, викрутити анкерні зв'язку, відкалібрувати і прографітіть різьблення кріплення.

Для виїмки трубної системи необхідно разболтіть роз'єм верхньої трубної дошки і корпусу підігрівача. Ввернути віджимні болти, Застропіть і витягти трубну систему з корпусу, встановити її вертикально в спеціальне пристосування (стенд). Далі слід зачистити поверхні ущільнювачів фланця трубної системи, виготовити і прографітіть прокладки, відкалібрувати і прографітіть різьблення кріплення.

Ремонт трубної системи. Провести зовнішній огляд, перевірити герметичність трубної системи, оглянути трубопровід відсмоктування повітря і відбійні щитки, потім зачистити і заварити дефектні місця.

Ремонт трубної дошки. Трубна дошка очищається від бруду та іржі до чистого металу. Великі дефекти заварюються (наплавляються) з подальшим відновленням поверхні. Наприклад, для захисту трубних дощок маслоохладителей від корозійно-ерозійного впливу середовища їх покривають епоксидної шпаклівкою. Для цього очищену поверхню фосфатують, сушать не менше 24 год, потім ретельно промивають миючим розчином до повного видалення пухких відкладень. Після промивання поверхню обезжиривається і покривається в два шари епоксидної шпаклівкою ЕП-00-10 або ЕП-00-20. Після нанесення кожного шару поверхню просушується не менше 24 год при температурі навколишнього повітря 20 ° С.

## Список літератури

1. РД 26-14-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Элементы теплообменных аппаратов.
2. РД 26-15-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений.
3. ГОСГ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
4. ГОСТ 28759.2-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. М.: 26 с.
5. ГСТУ 3-17-191-2000.Посудини та апарати сталні зварні. Загальні технічні вимоги.
6. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты общего и специального назначения. Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991.— 106 с.
7. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета при малоцикловых нагрузках. М.: Изд-во стандартов, 1983. —30 с.
8. ГОСТ 28759.2-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов. 1990. 26 с.
9. ОСТ 26-02-1015-85. Крепление труб в трубных решетках