

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_   
підпис, дата

## Кваліфікаційна робота бакалавра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"  
освітня програма "Обладнання нафто-  
та газопереробних виробництв"

Тема роботи: Установка г-43-107 каталітичного крекінгу  
вакуумного газойлю. Розробити кожухотрубний випарник  
ректифікаційної колони

Виконав:  
студент групи ХМ – 82р  
Амтір Амамір Алі Амтір

\_\_\_\_\_   
підпис

Залікова книжка  
№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, ст. викладач

Острога Руслан Олексійович

\_\_\_\_\_   
підпис, дата

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**Кафедра хімічної інженерії**

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"  
Освітня програма "Обладнання нафто- та газопереробних виробництв"

Курс 4 Група ХМ-82р Семестр 8

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студент Амтір Амамір Алі Амтір

1 Тема проекту: Установка г-43-107 каталітичного крекінгу вакуумного газойлю. Розробити кожухотрубний випарник ректифікаційної колони

2 Вихідні дані: Розробити кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування бутан-пентанової суміші продуктивністю 8000 кг/год. Склад вуглеводнів: бутан 2 % мас.; пентан 98 % мас. Тиск у міжтрубному просторі випарника 0,45 МПа.

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

1. Технологічна схема установки г-43-107 – 1,5 арк.
2. Складальне креслення кожухотрубного випарника – 1,0 арк.
3. Складальне креслення пучка трубного – 0,5 арк.

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.; 2. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

Етапи та розділи проектування	ТИЖНІ				
	1	2,3	4,5	6,7	8
1 Вступна частина	x				
2 Технологічна частина		xx			
3 Проектно-конструкторська частина			xx		
4 Розробка креслень				xx	
5 Оформлення записки					x
6 Захист роботи					x

6 Дата видачі завдання

жовтень 2021 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

ст. викл. Острога Р.О.

## Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	7
1.1 Опис технологічної схеми установка г-43-107 каталітичного крекінгу вакуумного газойлю	7
1.2 Теоретичні основи теплообмінних процесів	9
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів	18
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	22
2.1 Технологічні розрахунки	22
2.2 Конструктивні розрахунки	26
2.3 Гідравлічний опір апарата	28
2.4 Вибір допоміжного обладнання	29
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	33
3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки	33
3.2 Розрахунок опори апарата	36
4 Монтаж та ремонт апарата	39
4.1 Монтаж розробленого апарата	39
4.2 Ремонт апарата	37
5 Охорона праці	43
Список літератури	49
Додаток – Специфікації	

					ХІ.Т.00.00.00 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лім.	Лист	Листів
Розроб.		Амтір Амамір					
Перевір.		Острога				4	50
Реценз.					<b>СумДУ, ХМ-82р</b>		
Н. Контр.							
Затверд.		Склабінський					
<b>Випарник ректифікаційної колони</b> Пояснювальна записка							

## Вступ

Основними завданнями, що стоять перед нафтопереробною промисловістю – збільшення обсягу виробництва нафтопродуктів, розширення їх асортименту та підвищення якості. В умовах безперервного зростання переробки сірчистих та високосірчистих, а також високопарафіністих нафт потрібно принципово змінити технологію переробки нафти. Високі значення набули вторинні, а також каталітичні процеси, одним із яких є процес каталітичного крекінгу [1].

Процес каталітичного крекінгу є одним із найбільш поширених великотоннажних процесів поглибленої переробки нафти та значною мірою визначає техніко-економічні показники сучасних та перспективних НПЗ паливного профілю [2].

Основним цільовим призначенням процесу є вихід високооктанових бензинів та зріджених газів, які є сировиною для подальшого виробництва високооктанових компонентів бензинів, а також сировиною для нафтохімічних виробництв. За період свого розвитку процес каталітичного крекінгу вдосконалювався як щодо способу контакту сировини та каталізатора, так і щодо застосовуваного каталізатора [2].

Кожухотрубний випарник – це теплообмінний апарат, в якому здійснюється процес фазового переходу рідкого теплоносія в газоподібний стан за рахунок підведення тепла від гарячішого теплоносія. Таким гарячим теплоносієм, у нашому конкретному випадку, є водяна пара.

Кожухотрубні горизонтальні випарники із плаваючою голівкою типу ВП виготовляють із діаметром корпусу 800–1600 мм при одному трубному пучку із площею поверхні теплообміну 38–170 м<sup>2</sup>, при застосуванні двох або трьох трубних пучків діаметр корпусу становить 2400–2800 мм, загальна площа поверхні теплообміну становить 192–340 м<sup>2</sup>. Для випаровування технологічних середовищ під тиском 1–2,5 МПа, що працюють у діапазоні температур мінус 40–60°С, у холодильних установках загальнопромислового призначення застосовують кожухотрубні горизонтальні випарники типу ВТ-11. У них об'єм парового простору значно зменшений, але передбачений сухопарник, який відокремлює краплі рідини та виключає попадання їх в усмоктувальну лінію компресора. Такі випарники ви-

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

готовляють із діаметром корпусу 400–2000 мм при довжині труб 3000–6000 мм, числі ходів у трубному просторі 2–8 [3].

У даній кваліфікаційній роботі проектуємо випарник із плаваючою голівкою (типу ВП) для випаровування бутан-пентанової суміші. Загалом кваліфікаційну роботу виконано у відповідності до методичних вказівок [4] із представленням усіх регламентованих розділів.

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

## 1 Технологічна частина

### 1.1 Опис технологічної схеми установка г-43-107 каталітичного крекінгу вакуумного газойлю

Одне з провідних місць серед вторинних процесів нафтопереробки належить процесу каталітичного крекінгу важких дистилатних фракцій на дрібнодисперсних каталізаторах. Цільовим призначенням такого процесу є одержання високооктанового бензину. Газы, що багаті на бутан-бутиленові та пропан-пропіленові фракції, знаходять широке застосування у якості сировини для виробництва високооктанового компонента бензину – алкілату, а також у виробництві синтетичного каучуку та в нафтохімії [2].

Легкий газойль каталітичного крекінгу також використовують у якості компонента дизельного палива. Важкий газойль із високим вмістом поліциклічних ароматичних сполук має широке застосування у якості сировини для отримання дисперсного технічного вуглецю, а також у якості компоненту мазутів [2].

Основною сировиною крекінгу є вакуумні газойлі широкого фракційного складу, наприклад, із температурами википання від 300 до 500°C. Останніми роками стали застосовувати обтяжені вакуумні газойлі з температурою кінця кипіння до 550 і навіть 590°C. Для розширення ресурсів сировини використовують і сировину вторинного походження, зокрема газойлі коксування. Сировина каталітичного крекінгу повинна мати низьку коксівність (не більше 0,5 % мас.), тобто містити трохи поліциклічних ароматичних вуглеводнів і смолистих речовин, що викликають швидке закоксування каталізатора. Окрім того, у сировині має бути забезпечено низький (не більше 20–25 г/т) вміст металів, здатних дезактивувати (отруїти) каталізатор. На даний час розробляють способи попередньої деметалізації сировини. Зольність сировини крекінгу, зазвичай, перебуває у межах від 0,006 до 0,007 % мас.

На рис. 1.1 наведено технологічну схему установка г-43-107 каталітичного крекінгу вакуумного газойлю. Принцип її роботи полягає в наступному.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>7</b>

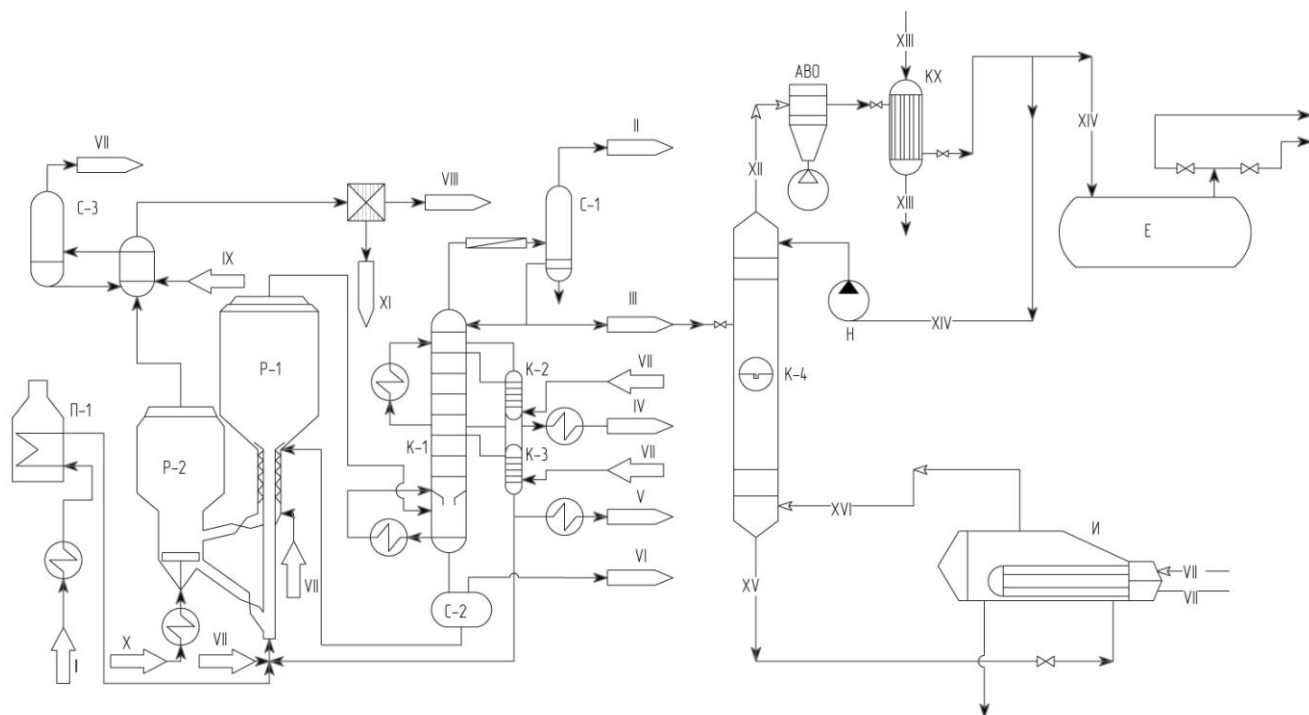


Рисунок 1.1 – Технологічна схема установка г-43-107  
каталітичного крекінгу вакуумного газойлю

Гідроочищену сировину після підігріву в теплообмінниках та печі П-1 змішують із рециркулятом і водяною парою і вводять у вузол змішування проточного ліфт-реактора Р-1. Контактуючи з регенованим гарячим цеолітовим катализатором, сировина випаровується, зазнаючи каталізу в ліфт-реакторі і далі надходить у зону киплячого шару Р-1. Продукти реакції відокремлюють від каталізаторного пилу в двоступінчастих циклонах і спрямовують у нижню частину ректифікаційної колони К-1 на розділення. Закоксований каталізатор з відпарної зони Р-1 подають в зону киплячого шару регенератора Р-2, де здійснюють випал коксу в режимі повного окислення оксиду вуглецю в діоксид. Регенований каталізатор по нижньому похилому каталізаторопроводу далі надходить у вузол змішування ліфт-реактора. Повітря на регенерацію нагнітають повітродувкою. За необхідності його можна нагрівати в топці під тиском.

Димові гази через внутрішні двоступінчасті циклони спрямовуються на утилізацію тепла (на електрофільтри та утилізатор). У К-1 для регулювання температурного режиму передбачені верхнє гостре і проміжні циркуляційні зрошення. Відбір легкого та важкого газойлів здійснюють у випарних колонах К-2 та К-3.

Нижня частина колони є відстійником каталізаторного шламу, який повертають у відпарну зону Р–1. Частину важкого газойлю подають у вузол змішування ліфт-реактора у якості рециркулянта. Із верха колони відводять суміш парів бензину, води та газів крекінгу, яку після охолодження та конденсації поділяють у газосепараторі С–1 на газ та нестабільний бензин, які прямують у блок газофракціонування та стабілізації бензину відповідно.

Цільовою продукцією блоку стабілізації бензину є стабільний бензин. Нестабільний бензин, попередньо підігрівається, і під тиском надходить на тарілку живлення стабілізаційної колони К–4. Зверху колони К–4 суміш вуглеводневих газів надходить в апарат повітряного охолодження АВО, а потім в холодильник Х, де охолоджується, конденсується, а потім доохолоджується за рахунок повітря (у першому випадку) та води (у другому випадку). Далі ця суміш, вже в рідкому стані, ділиться на два потоки – одна частина подається на зрошення колони К–4, а інша – в ємність для тимчасового зберігання. Із нижньої частини колони К–4 бутан-пентанова фракція надходить у випарник І, де відбувається часткове її випаровування, що забезпечує парове живлення колони.

## 1.2 Теоретичні основи теплообмінних процесів

Теоретичні основи процесу теплообміну, які представлені у даному підрозділі, виконано на підставі аналізу літературних джерел [3, 5, 6].

Перенесення тепла, що відбувається між тілами з різною температурою, називається теплообміном. Тепло мимовільно переходить від більш нагрітого до менш нагрітого тіла. Тіла, що у теплообміні, називаються теплоносіями. Теплоносії з вищою температурою називаються гарячими (вони віддають тепло), і з нижчою — холодними (вони сприймають тепло).

Теплообмінними апаратами, або теплообмінниками, називаються апарати передачі тепла від більш нагрітого теплоносія до іншого, менш нагрітому.

Теплообмінники як самостійні агрегати або частини інших апаратів та пристроїв широко застосовуються на хімічних підприємствах, тому що проведення технологічних процесів здебільшого супроводжується виділенням чи поглинанням тепла.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>9</b>
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Процес теплообміну може проводитися для різних цілей – нагрівання або охолодження; теплоносіями можуть бути рідини, гази або тверді сипкі матеріали; процес теплообміну може супроводжуватися зміною агрегатного стану одного або обох теплоносіїв або проводитись без цієї зміни.

**За принципом дії розрізняють:**

– *рекуперативні теплообмінники* (теплопередача відбувається через стінку, що розділяє обидва теплоносія);

– *регенеративні теплообмінники* (тепло більш нагрітого теплоносія віддається твердому тілу – насадці, а потім менш нагрітій теплоносій, омиваючи насадку, охолоджує її, сам при цьому нагріваючись);

– *змішувальні теплообмінники* (обмін тепла між теплоносіями відбувається при їх безпосередньому зіткненні між собою).

Перші два види теплообмінників називаються поверхневими через те, що у цих теплообмінниках поверхня теплообміну геометрично визначна. У змішувальних теплообмінниках існує фізична поверхня теплообміну, але її геометрично визначити неможливо.

Різноманітність у призначенні теплообмінників, умов, у яких вони працюють, властивостей теплоносіїв, матеріалів, з яких виготовлені теплообмінники є причиною існування безлічі різних конструкцій..

**Рекуперативні теплообмінники класифікуються за такими ознаками:**

– за призначенням (холодильники, нагрівачі, конденсатори, випарники, реактори та теплообмінники, вбудовані в апарати);

– по току теплоносіїв (прямоточні, протиточні та змішаного току);

– за конструкційним матеріалом (металеві та неметалеві);

– за конструкцією та формою поверхні (теплообмінники з поверхнею, зробленою із труб та теплообмінники з поверхнею, зробленою з листа);

– за способом компенсації температурних подовжень (без компенсації або жорсткої конструкції, з компенсацією пружним елементом, компенсацією за рахунок вільних переміщень).

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

**На вибір типу та конструкції теплообмінника, а також на схему його включення впливають такі причини:**

- кількість переданого тепла;
- термодинамічні параметри (температури, тиски, обсяги та агрегатні стани теплоносіїв);
- фізико-хімічні властивості (щільність, в'язкість тощо);
- агресивність теплоносіїв до конструкційного матеріалу;
- ступінь забрудненості теплоносія та характер відкладень;
- властивості конструкційного матеріалу;
- призначення апарату та процеси, які у ньому протікають;
- напруги, що виникають як в результаті дії тиску теплоносіїв, так і різниці теплових подовжень різних частин теплообмінника і статичний напір, що викликаний теплоносієм.

Кількість тепла, що передається, є основою для визначення величини поверхні теплообміну. Воно дає конструктору непряму вказівку та на вибір конструкції теплообмінника (наприклад, простий змійовик або кожухотрубний теплообмінник).

Термодинамічні параметри та фізико-хімічні властивості впливають на величину коефіцієнта теплоотдачі  $\alpha$  і коефіцієнта теплопередачі  $K$  і, відповідно, на величину і форму поверхні теплообміну.

Термодинамічні параметри та фізико-хімічні властивості впливають на величину коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  та коефіцієнта теплопередачі  $K$  і, отже, на величину та форму поверхні теплообміну.

**Коефіцієнт теплопередачі** вимірює кількість тепла, що передається від одного тіла до іншого в одиницю часу через одиницю поверхні при різниці температур між теплоносіями  $1^\circ\text{C}$ .

Температури теплоносіїв визначають середню різницю температур  $\Delta t_{cp}$  та поверхню теплообміну  $F$ , а також вибір току теплоносіїв.

Об'єми теплоносіїв визначають перерізи каналів теплообмінника, викликаючи застосування одно- або багатোধодових конструкцій. Агресивність теплоносіїв вимагає застосування тих чи інших конструкційних матеріалів, які визначають

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>11</b>

форму та конструкцію теплообмінника. Забрудненість теплоносіїв викликає застосування заходів, що перешкоджають відкладенню осаду, та вибір конструкції, що полегшує чищення забруднених поверхонь.

Призначення апарату може спричинити появу додаткових пристроїв, наприклад мішалок для інтенсифікації тепло- та масообміну, сепараційних пристроїв у випарних апаратах тощо.

Допустима величина механічних напруг визначає необхідність температурної компенсації та конструкцію компенсуючого пристрою.

### Основні співвідношення для теплообмінників.

Вихідні дані визначення розмірів теплообмінника визначаються з теплового балансу

$$Q = G_1 \cdot \Delta i_1 = G_2 \cdot \Delta i_2, \quad (1.1)$$

де  $Q$  – **тепловий потік** (кількість тепла, що передається від одного теплоносія іншому в одиницю часу), Вт;

$G_1$  і  $G_2$  – маса теплоносіїв, що обмінюються теплом, кг/с;

$\Delta i_1$  і  $\Delta i_2$  – зміна тепломістку теплоносіїв під час процесу теплопередачі, Дж/кг.

Якщо агрегатний стан теплоносія під час процесу теплопередачі залишається незмінним, то

$$\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (1.2)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  – температури теплоносія на вході та виході теплообмінника, К;

$c_p$  – середня теплоємність при температурі

$$\frac{t_1 + t_2}{2}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (1.3)$$

Якщо в результаті кипіння або конденсації агрегатний стан теплоносія змінюється, то зміна тепломістку дорівнює

$$\Delta i = c_n \cdot (t_n - t_n) + \tau + c \cdot (t_n - t_j), \quad \text{Дж/кг}; \quad (1.4)$$

де  $t_n$  і  $t_j$  – температури пари та рідини, К;

$t_n$  – температура насичення пари, К;

$c_n$  і  $c_j$  – середні теплоємності пари та рідини, Дж/(кг·К);

$\tau$  – теплота пароутворення, Дж/кг.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Для теплообмінників, у яких нагрівання відбувається паром, можна вважати, що  $t_{п}=t_{к}$  і  $t_{ж}=t_{п}$ .

Тоді (як це часто вважають)

$$\Delta i = \tau . \quad (1.5)$$

Визначення поверхні теплообмінника проводиться за основним рівнянням теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{\Delta t_{cp} \cdot K}, \quad (1.6)$$

де  $F$  – поверхня теплообміну,  $m^2$ ;

$\Delta t_{cp}$  – середня різниця температур,  $K$ ;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ .

**Температурний напір**  $\Delta t_{cp}$  є рушійною силою будь-якого теплообміну і залежить від схеми руху теплоносіїв та збереження або зміни їхнього агрегатного стану. При зміні агрегатного стану обох теплоносіїв

$$\Delta t_{cp} = t_{конд} - t_{кип}, \quad K . \quad (1.7)$$

Якщо хоча б один із теплоносіїв не змінює свого агрегатного стану, то різниця температур при протіканні його вздовж стінки, що розділяє теплоносії, змінюватиметься. У таких випадках температурним тиском є середня різниця температур.

Для протитечії, паралельного току, а також у разі перебігу теплоносія вздовж стінки, що розділяє, одна сторона якої омивається теплоносієм, що зберігає постійну температуру в результаті зміни його агрегатного стану, температурним напором є середня логарифмічна різниця температур

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}, \quad (1.8)$$

де  $\Delta t_1$  – більша різниця температур теплоносіїв біля одного кінця теплообмінника,  $K$ ;

$\Delta t_2$  – менша різниця температур теплоносіїв біля іншого кінця теплообмінника,  $K$ .

Якщо відношення  $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \leq 2$ , то з достатньою точністю у якості середньої різ-

ниці температур можна приймати середню арифметичну різницю

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>13</b>

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}. \quad (1.9)$$

Середня різниця температур при протитечії більше, ніж при паралельному тоці. Отже, поверхня теплопередачі, необхідна передачі заданої кількості тепла, виходить найменшою у разі протитечії. Крім того, при паралельному тоці кінцева температура теплоносія, що гріє, повинна бути обов'язково вище кінцевої температури теплоносія, що нагрівається. При протитечії кінцева температура теплоносія, що гріє, може бути і нижче кінцевої температури нагрівального теплоносія, завдяки чому в протиточних теплообмінниках вище ступінь рекуперації тепла. Із погляду економіки протиточні теплообмінники вигідніші, що пояснює їхнє переважне застосування. Застосування протитечії можуть завдати або більш важкі температурні умови роботи металу теплообмінної поверхні з боку входу гарячого теплоносія, або технологічні міркування, наприклад, небажання піддавати нагріванню оброблювані продукти.

Для перехресного току та інших схем взаємного руху теплоносіїв середня різниця температур підраховується як для протитоку, але отриманий результат множиться на поправочний коефіцієнт  $\varepsilon_t$ , тобто

$$\Delta t'_{cp} = \varepsilon_t \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1.10)$$

де  $\varepsilon_t$  – поправочний коефіцієнт.

Наступне завдання полягає у визначенні коефіцієнта теплопередачі. Для плоскої стінки коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \Sigma \frac{s}{\lambda}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (1.11)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі від гріючого теплоносія до стінки і від стінки до теплоносія, що нагрівається.,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;

$s$  – товщина стінки, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

**Коефіцієнт тепловіддачі** вимірює тепловий потік, яким обмінюються через одиницю поверхні рідина або газ та стінка при різниці температур між ними 1°C.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>14</b>

**Коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки** вимірює кількість тепла, що поширюється протягом 1 секунди в тілі від однієї поверхні площею  $1 \text{ м}^2$  до іншої такої ж поверхні при товщині стінки 1 м і при різниці температур на поверхнях  $1^\circ\text{C}$ . Величина коефіцієнта теплопровідності залежить від природи речовини стінки (цегла, метал тощо), його структури та інших властивостей і практично не залежить від температури.

Більшість стінок доводиться розглядати як багат шарові, тому що вони під час роботи поступово покриваються шарами накипу, мулу, мастила або іржі. Забруднюючі матеріали мають малу теплопровідність, в десятки і сотні разів меншу, ніж теплопровідність металів. Термічний опір цих шарів, навіть при їх малій товщині, може набагато перевищити термічний опір самої металеві стінки.

**Термічний опір багат шарові стінки** дорівнює сумі опорів всіх шарів, тобто

$$\Sigma \frac{s}{\lambda} = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots \quad (1.12)$$

Зниження величини коефіцієнта теплопередачі, викликане збільшенням термічного опору, враховують при розрахунку. При цьому задаються максимальною товщиною забрудненого шару для твердих речовин від 0,5 до 1 мм, для мастила ~ 0,1 мм.

Завжди потрібно прагнути вибором технологічного режиму чи відповідних швидкостей теплоносіїв зменшувати швидкість наростання забруднюючих шарів. Небажано охолоджувальну воду виводити з теплообмінників із температурою вище  $45\text{--}50^\circ\text{C}$ , тому що при цих температурах починається виділення накипу. Швидкість охолоджуючої води, особливо, якщо вона береться прямо з річки і несе в собі багато завислих частинок, не рекомендується брати нижче 0,5 м/с, інакше поверхня незабаром заросте мулом.

При проектуванні та експлуатації теплообмінників доводиться вирішувати питання, пов'язані з розробкою ефективних теплообмінників, що мають високі *питомі теплові навантаження*  $q = Q / F$ , або зі збільшенням  $q$ . У таких випадках  $Q$  або  $F$  задані, середня різниця температур чи задана, чи може змінюватися дуже незначно. Тоді єдиною змінною величиною залишається коефіцієнт теплопередачі  $K$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s}{\lambda}} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (1.13)$$

Термічний опір тонких стінок з металів, що мають велику теплопровідність, є малим. Вважаючи  $\frac{s}{\lambda} = 0$ , отримаємо

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (1.14)$$

Ця спрощена формула для визначення  $K$  зручна для грубих розрахунків.

Із формули випливає, що  $K$  завжди менше найменшого коефіцієнтів тепловіддачі і в межі прагне до нього.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Якщо } \alpha_1 < \alpha_2, \text{ то } K < \alpha_1. \\ \text{Якщо } \alpha_1 \rightarrow \infty, \text{ то } K \rightarrow \alpha_1. \\ \text{Якщо } \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \text{ то } K = \frac{\alpha}{2}. \end{array} \right\} \quad (1.15)$$

Таким чином, розробляючи конструкцію або вживаючи заходів по інтенсифікації діючих теплообмінників, є сенс прагнути збільшити коефіцієнт тепловіддачі тільки з боку поверхні, з якої він малий. Прагнути поліпшити теплообмін шляхом збільшення обох коефіцієнтів теплообміну слід лише за  $\alpha_1 \approx \alpha_2$ .

Термічний опір стінки знижує  $K$ . Вплив термічного опору невеликий тільки в тих випадках, коли  $\frac{s}{\lambda}$  є малим у порівнянні з  $\frac{1}{\alpha_1}$  і  $\frac{1}{\alpha_2}$ . Може статися, що  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  є великими, скажімо при кипінні та конденсації, а труби зроблені з матеріалу з порівняно невеликою теплопровідністю, наприклад, з хромонікелієвої сталі ( $\lambda=12$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)), або з пластичної маси, або зроблені товстостінними. Тоді основним опором, що обмежує величину теплового навантаження, виявиться термічний опір стінки, і їм у жодному разі знехтувати вже не можна.

Після того як  $Q$ ,  $K$  і  $\Delta t_{cp}$  знайдені, за основним рівнянням теплопередачі визначають поверхню теплообміну, яка для труби або трубного пучка дорівнюватиме

$$F = \pi \cdot d_p \cdot n \cdot l = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad \text{м}^2, \quad (1.16)$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>16</b>

де  $l$  – довжина трубок, м;

$n$  – число трубок;

$d_p$  – розрахунковий діаметр трубок, м.

Залежно від умов теплообміну поверхню визначають або за внутрішнім, зовнішнім, або по середньому діаметру трубок. Оскільки величина  $K$  визначається значенням меншого коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$ , то розрахунковий діаметр  $d_p$  беруть по той бік труби, з якої коефіцієнт тепловіддачі менший. При приблизно рівних коефіцієнтах тепловіддачі приймають у якості розрахункового середній діаметр, тобто

$$\left. \begin{array}{l} \text{якщо } \alpha_g < \alpha_n, \text{ то } d_p = d_g; \\ \text{якщо } \alpha_g > \alpha_n, \text{ то } d_p = d_n; \\ \text{якщо } \alpha_g \approx \alpha_n, \text{ то } d_p = \frac{d_g + d_n}{2}; \end{array} \right\} \quad (1.17)$$

Під час визначення коефіцієнтів теплопередачі іноді доводиться задаватися температурою стінки. Після визначення  $K$  цю температуру необхідно перевірити розрахунком. Якщо отримана температура помітно відрізняється від прийнятої, слід знову поставити температуру стінки і знову провести перевірку, доки не буде досягнуто задовільного збігу прийнятої та отриманої температури.

Температура стінки завжди буває ближче до температури теплоносія з великим коефіцієнтом  $\alpha$ . Вона дорівнює середньої арифметичної тільки в порівняно рідкісних випадках, коли обидва коефіцієнти тепловіддачі приблизно рівні.

Температура стінки з боку теплоносія, що гріє

$$t_r = T - \frac{K}{\alpha_r} \cdot \Delta t_{cp} = T - \frac{q}{\alpha_r} \quad (1.18)$$

Температура стінки з боку холоднішого теплоносія, що нагрівається

$$t_x = t + \frac{K}{\alpha_x} \cdot \Delta t_{cp} = t + \frac{q}{\alpha_x} \quad (1.19)$$

де  $T$  – середня температура теплоносія, що гріє, К;

$t$  – середня температура теплоносія, що нагрівається, К;

$\alpha_r, \alpha_x$  – коефіцієнти тепловіддачі з боку гарячого та холоднішого теплоносіїв, Вт/(м<sup>2</sup>·К).



З цих рівнянь випливає, що зниження відведення тепла призводить до підвищення температур стінки та зменшення різниці між температурами обох сторін стінок.

### Середня температура стінки

$$t_{cp} = \frac{t_x + t_r}{2}. \quad (1.20)$$

Визначення температури стінки апаратів необхідне для призначення допустимих напруг, з'ясування температурних подовжень, в оцінці температурних напруг, оцінці швидкості корозії та у багатьох інших випадках.

Зі сказаного ясна важливість по можливості точного визначення  $\alpha_v$  і  $\alpha_n$  для проектування ефективних теплообмінників.

### 1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів

У проєктованому апараті по трубному простору рухається водяна пара, а по міжтрубному – вуглеводнева сировина. Кубовий залишок ректифікаційної колони є сумішшю, що складається в основному з рідкого пентану, але також присутній і бутан.

Загальний вид проєктованого кожухотрубного випарника з паровим простором типу ВП представлений на рис. 1.2.

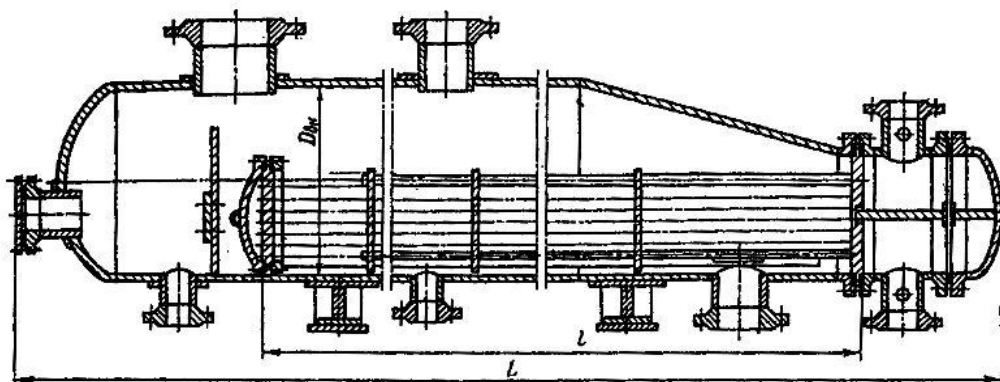


Рисунок 1.2 – Схема кожухотрубного випарника з паровим простором

При температурі 90°C під абсолютним тиском 0,45 МПа в міжтрубний простір випарника подається холодний теплоносій – бутан-пентанова суміш. При цьому в розподільну камеру апарату надходить гарячий теплоносій – насичена водяна пара (під тиском 0,2 МПа). За допомогою теплопередачі через стінку теплообмінних труб відбувається активне випаровування вуглеводневої суміші.

**Основні властивості використовуваних речовин.** Вуглеводні – найпростіші органічні сполуки, що складаються з двох елементів: вуглецю та водню. Граничними вуглеводнями, або алканами (міжнародна назва), називаються сполуки, склад яких виражається загальною формулою  $C_nH_{2n+2}$ , де  $n$  – це число атомів вуглецю. У молекулах граничних вуглеводнів атоми вуглецю пов'язані між собою простим (одинарним) зв'язком, проте інші валентності насичені атомами водню.

**Пентан ( $C_5H_{12}$ )** – це насичений ациклічний вуглеводень класу алканів. Має три структурні ізомери: н-пентан, ізо-пентан, нео-пентан. Слід зазначити, що пентан має четвертий клас небезпеки. Молекулярна маса пентану становить 72,15 г/моль [7].

**Бутан ( $C_4H_{10}$ )** – безбарвний горючий газ, зі специфічним запахом. Має два структурні ізомери: н-бутан, ізо-бутан. При нормальному тиску легко зріджується від мінус 0,5°C, замерзає при мінус 138°C. При підвищеному тиску та звичайній температурі – це легколетка рідина. Критична температура +152°C, критичний тиск 3,797 МПа [8].

**Водяна пара** – це газоподібний стан води. Не має кольору, смаку та запаху. Утворюється молекулами води під час її випаровування. Водяну пару використовують у якості гарячого теплоносія у різних технологічних процесах [9].

Вибір конструктивних матеріалів для виготовлення апарата проводився на підставі [10–12]. Вибір матеріалу диктується в основному його корозійною стійкістю і теплопровідністю, причому конструкція теплообмінного апарату істотно залежить від властивостей вибраного матеріалу.

Матеріали для виготовлення кожухотрубного випарника з паровим простором вибираємо відповідно до специфіки його експлуатації, при цьому враховуємо

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

можливу зміну вихідних фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом робочого середовища, температури і хіміко-технологічного процесу, що протікає.

Також слід враховувати: механічні властивості матеріалу – межа міцності, відносне подовження, твердість тощо; технологічність виготовлення (особливо зварюваність); хімічну стійкість проти роз’їдання; теплопровідність.

Вибір конструктивного матеріалу робимо, виходячи із його низької вартості і не дефіцитності, але щоб можна було забезпечити ефективну технологічність виготовлення.

Таким чином, на підставі вищезазначеного, для виготовлення корпусу, фланців, розподільних камер, а також деталей, які працюють під тиском раціонально використовувати сталь 16ГС. Фізико-механічні властивості сталі 16ГС приведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні фізико-механічні властивості сталі 16ГС

Показник	Значення
Модуль пружності E, МПа	200000
Модуль зсуву G, МПа	77000
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	не менше 360
Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	не менше 180
Відносне звуження $\psi$ , %	56
Відносне подовження $\delta$ , %	25
Твердість по Брінеллю, НВ	115
Зварюваність	без обмежень

Для виготовлення теплообмінних труб, штуцерів, крипіжних деталей (болти, гайки, шпильки), панелей, кронштейнів, ребер жорсткості і т. ін. використовуємо сталь 20. Фізико-механічні властивості сталі 20 приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні фізико-механічні властивості сталі 20

Показник	Значення
Модуль пружності $E$ , МПа	200000
Модуль зсуву $G$ , МПа	74000
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	не менше 420
Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	не менше 250
Відносне звуження $\psi$ , %	40
Відносне подовження $\delta$ , %	16
Твердість по Брінеллю, НВ	156
Зварюваність	без обмежень, окрім хіміко-термічно оброблених деталей

Для виготовлення неметалевих прокладок для ущільнення роз'ємів фланцевих з'єднань апарата використовуємо пароніт – листовий прокладковий матеріал, що виготовляється пресуванням азбокаучукової маси, яка складається із азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів.

## 2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Технологічні розрахунки

Технологічний розрахунок починається із визначення основних теплофізичних властивостей теплоносіїв [13].

Середня молекулярна маса потоку:

$$M = M_{n-C_4H_{10}} \cdot x_{n-C_4H_{10}} + M_{C_5H_{12+}} \cdot x_{C_5H_{12+}}, \text{ кг/кмоль} \quad (2.1)$$

де  $M_{n-C_4H_{10}}$ ,  $M_{C_5H_{12+}}$  – відповідно мольні маси н-бутану та пентану;

$$M = 58 \cdot 0,02 + 72 \cdot 0,98 = 71,72 \text{ кг/кмоль.}$$

Ентальпія потоку:

$$q = q_{385}^{жс} \cdot M, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.2)$$

де  $q_{385}^{жс}$  – ентальпія нафтових рідин, кДж/кг [14].

$$q = 450 \cdot 71,72 = 32274 \text{ кДж/кмоль}$$

Годинна витрата тепла у випарнику:

$$Q_p = \frac{q \cdot G}{M}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

$$Q_p = \frac{32274 \cdot 8000}{71,72} = 3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}} = 996 \text{ кВт.}$$

Параметри гріючої водяної пари при її тиску  $p = 0,2$  МПа: температура  $t_{2H} = 120^\circ\text{C}$ , питома теплота конденсації  $r = 2208$  кДж/кг [15].

На підставі даних промислової експлуатації та з метою забезпечення достатнього температурного напору при передачі від водяної пари до кубової рідини [13]: кінцева температура водяної пари  $t_{2K} = 109^\circ\text{C}$ ; кінцева температура парів бутан-пентану  $t_{1K} = 111^\circ\text{C}$ .

Витрата пари:

$$Z = \frac{Q_p}{r \cdot \eta_T}, \text{ кг/год.} \quad (2.4)$$

де  $\eta_T$  – коефіцієнт утримання тепла, у середньому  $\eta_T = 0,95$  [13].

$$Z = \frac{996 \cdot 10^3 \cdot 3600}{2208 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 1709 \text{ кг / год.}$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>22</b>

Визначення температурних напорів.

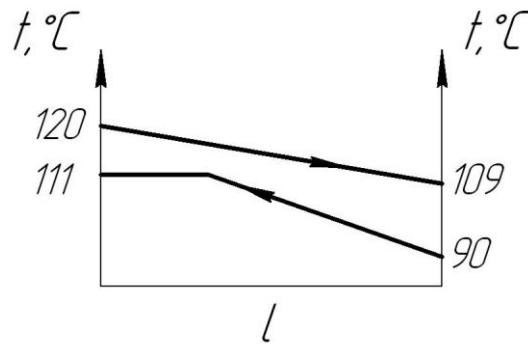


Рисунок 2.1 – Температурна схема процесу випаровування бутан-пентану

Середня різниця температур:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln\left(\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}\right)}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

– більша різниця температур дорівнює  $\Delta t_B = 109 - 90 = 19^\circ\text{C}$ ;

– менша різниця температур дорівнює  $\Delta t_M = 120 - 111 = 9^\circ\text{C}$ .

$$\Delta t_{CP} = \frac{19 - 9}{\ln\left(\frac{19}{9}\right)} = 13,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку вуглеводнів [14]:

$$\alpha_2 = 7,77 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{\rho_{II} \cdot r}{\rho_{Ж} - \rho_{II}}\right)^{0,033} \cdot \left(\frac{\rho_{Ж}}{\sigma}\right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda_{Ж}^{0,75}}{\mu_{Ж}^{0,45} \cdot c_{РЖ}^{0,12} \cdot T_S^{0,37}} \cdot q^{0,7}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.6)$$

де  $\rho_{II}$ ,  $\rho_{Ж}$  – відповідно густини парової та рідкої фаз,  $\text{кг/м}^3$ ;

$r$  – теплота пароутворення,  $\text{Дж/кг}$ ;

$\sigma$  – поверхневий натяг на межі розділу між рідиною та паром,  $\text{Н/м}$ ;

$\lambda_{Ж}$  – теплопровідність рідини,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

$\mu_{Ж}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$c_{РЖ}$  – теплоємність рідини,  $c_{РЖ} = 1600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  [15];

$T_S$  – температура кипіння вуглеводнів,  $\text{К}$ ;

$q$  – теплонапруження поверхні нагрівання,  $\text{Вт/м}^2$ .

Усі фізичні параметри визначаються за кінцевою температурою вуглеводневої сировини  $T_S = 384 \text{ К}$ .

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>23</b>

Густину парової фази визначають за рівнянням Менделєєва-Клапейрона:

$$\rho_{II} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_S} \cdot \frac{p}{p_0}, \text{ кг/м}^3 \quad (2.7)$$

де  $\rho_0$  – густина пари за нормальних умов,  $\text{кг/м}^3$ .

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4} = \frac{71,72}{22,4} = 3,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{II} = 3,2 \cdot \frac{273}{384} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{98,1 \cdot 10^3} = 10,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Поверхневий натяг на межі пара – рідина [13]:

$$\sigma = \frac{21,2 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{M}{\rho_{Ж}}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot (T_{KP} - T_S - \delta), \frac{H}{M} \quad (2.8)$$

де  $M$  – мольна маса кубового залишку,  $M = 72 \text{ кг/кмоль}$ ;

$\rho_{Ж}$  – густина залишку за кінцевої температури  $T = T_S = 384 \text{ К}$ ,  $\rho_{Ж} = 530 \text{ кг/м}^3$ .

$T_{KP}$  – псевдокритична температура кубового залишку,  $\text{К}$ ;

$\delta$  – постійна,  $\delta = 7 \text{ К}$  [13].

$$T_{KP} = T_{KP_{H-C_4H_{10}}} \cdot x_{H-C_4H_{10}} + T_{KP_{C_5H_{12+}}} \cdot x_{C_5H_{12+}}, \text{ К} \quad (2.9)$$

де  $T_{KP_{H-C_4H_{10}}} = 426 \text{ К}$ ;  $T_{KP_{C_5H_{12+}}} = 470,2 \text{ К}$  – критичні температури компонентів [15].

$$T_{KP} = 426 \cdot 0,02 + 470,2 \cdot 0,98 = 469 \text{ К};$$

$$\sigma = \frac{21,2 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{71,72}{530}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot (469 - 384 - 7) = 6,27 \cdot 10^{-3} \frac{H}{M}.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості рідини для суміші неасоційованих рідин [14]:

$$\lg \mu_S = \lg \mu_{H-C_4H_{10}} \cdot x_{H-C_4H_{10}} + \lg \mu_{C_5H_{12+}} \cdot x_{C_5H_{12+}} \quad (2.10)$$

де  $\mu_{C_4H_{10}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_{C_5H_{12}} = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  — коефіцієнти динамічної в'язкості компонентів рідини [15].

$$\lg \mu_S = \lg 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 + \lg 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot 0,98,$$

$$\mu_S = 0,09 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\alpha_2 = 7,77 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{10,4 \cdot 483 \cdot 10^3}{530 - 10,4} \right)^{0,033} \cdot \left( \frac{530}{6,27 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,33} \cdot \frac{(0,95 \cdot 10^{-2})^{0,75}}{(0,09 \cdot 10^{-3})^{0,45} \cdot 1600^{0,12} \cdot 384^{0,37}} \cdot q^{0,7} ;$$

$$\alpha_2 = 0,325 \cdot q^{0,7} .$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку водяної пари, що конденсується [14]:

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot A \cdot q^{0,5} \cdot l^{0,35} \cdot d_B^{-0,25}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (2.11)$$

де А – коефіцієнт, що залежить від температури конденсату, А = 8 [14];

l – довжина труби, l = 6 м;

d<sub>В</sub> – внутрішній діаметр труби, d<sub>В</sub> = 0,025 – 2 · 2 = 0,021 м.

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot 8 \cdot q^{0,5} \cdot 6^{0,35} \cdot 0,021^{-0,25} ;$$

$$\alpha_1 = 53,509 \cdot q^{0,5} .$$

Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням теплових опорів стінки та забруднень її обох поверхонь [14]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (2.12)$$

де δ<sub>СТ</sub> – товщина стінки труби, δ<sub>СТ</sub> = 0,002 м;

λ<sub>СТ</sub> – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки труби,

λ<sub>СТ</sub> = 33,53 Вт/(м·К) [14];

δ<sub>1</sub> / λ<sub>1</sub> – тепловий опір забруднення внутрішньої поверхні труби,

$$\delta_1 / \lambda_1 = 0,000215 (м^2 \cdot К) / Вт [14];$$

δ<sub>2</sub> / λ<sub>2</sub> – тепловий опір забруднення зовнішньої поверхні труби,

$$\delta_2 / \lambda_2 = 0,0006 (м^2 \cdot К) / Вт [14].$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{0,002}{33,53} + 0,000215 + 0,0006 + \frac{1}{\alpha_2}} ;$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + 0,000875 + \frac{1}{\alpha_2}} .$$

Теплонапруження q = 31100 Вт/м<sup>2</sup> [13].



$$\alpha_1 = 53,509 \cdot 31100^{0.5} = 9436 \frac{Вт}{м^2 \cdot К};$$

$$\alpha_2 = 0,325 \cdot 31100^{0.7} = 454 \frac{Вт}{м^2 \cdot К};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{9436} + 0,000875 + \frac{1}{454}} = 314 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

Розрахований коефіцієнт теплопередачі потрапляє до необхідного діапазону [13, 14], отже, розрахунок виконано вірно.

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Розрахункова поверхня теплообміну становить:

$$F_P = \frac{Q_P}{q}, м^2 \quad (2.13)$$

$$F_P = \frac{996000}{31100} = 32 м^2$$

Вибираємо стандартизований кожухотрубний випарник із паровим простором типу ВП:

– внутрішній діаметр кожуха D, мм	800
– сортамент труб	25 × 2
– довжина труб, м	6
– кількість ходів по трубах	1
– загальна кількість труб	82
– кількість труб в одному ході	82
– поверхня теплообміну, м <sup>2</sup>	38

Коефіцієнт запасу теплообмінної поверхні апарата:

$$\beta = \frac{F - F_{MAX}}{F} \cdot 100\% , \quad (2.14)$$

$$\beta = \frac{38 - 32}{38} \cdot 100\% = 16\% .$$

Діаметри штуцерів випарника для підведення-відведення теплоносіїв визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (2.15)$$

де  $V$  і  $G$  – об'ємна та масова витрати рідини/пари відповідно, м<sup>3</sup>/с і кг/с;  
 $\rho$  – густина потоку середовища, кг/м<sup>3</sup>;  
 $w$  – швидкість витікання середовища, м/с.

Рекомендовані швидкості руху теплоносіїв [16]:

– для рідини 0,1–0,5 м/с при самопливі і 0,5–2,5 м/с в напірних трубопроводах;

– для пари та газу 5–30 м/с.

Діаметр патрубку для входу вуглеводневої сировини в апарат:

$$d_{XBH} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8000 / 3600}{3,14 \cdot 530 \cdot 0,25}} = 0,145 \text{ м}$$

Діаметр патрубку для виходу парів бутан-пентану:

$$d_{XBYH} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8000 / 3600}{3,14 \cdot 10,4 \cdot 5}} = 0,232 \text{ м}$$

Діаметр патрубку для входу водяної пари:

$$d_{GBH} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1709 / 3600}{3,14 \cdot 1,107 \cdot 30}} = 0,135 \text{ м}$$

Діаметр патрубку для виходу водяної пари:

$$d_{GBYH} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1709 / 3600}{3,14 \cdot 1,107 \cdot 30}} = 0,135 \text{ м}$$

За отриманими значеннями приймаємо стандартні патрубки:

- для входу вуглеводневої сировини  $D_y=150$  мм;
- для виходу парів пропан-бутану  $D_y=250$  мм;
- для входу водяної пари  $D_y=150$  мм;
- для виходу водяної пари  $D_y=150$  мм.

## 2.3 Гідравлічний опір апарата

Розрахунок гідравлічного опору випарника визначає кількість енергії, витраченої на рух теплоносіїв через апарат. Гідравлічний опір міжтрубного простору не визначаємо, оскільки, враховуючи невеликі швидкості теплоносія, його значення дуже маленьке [17, 18].

Гідравлічний розрахунок проводимо у відповідності до методики, що викладена у [18].

Повний напір, необхідний для руху рідини або газу через теплообмінник, визначаємо за такою формулою:

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{TP} + \Sigma \Delta P_M + \Sigma \Delta P_Y + \Sigma \Delta P_G, \quad (2.16)$$

де  $\Sigma \Delta P_{TP}$  – сума гідравлічних втрат на тертя, Па;

$\Sigma \Delta P_M$  – сума втрат напору в місцевих опорах, Па;

$\Sigma \Delta P_Y$  – сума втрат напору, обумовлених прискоренням потоку, Па;

$\Sigma \Delta P_G$  – перепад тиску для подолання стовпа рідини, Па.

Гідравлічні втрати на тертя в каналах при поздовжньому омиванні пучка труб теплообмінного апарату визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_E} \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (2.17)$$

де  $\lambda_{TP}$  – коефіцієнт опору тертя.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_E} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (2.18)$$

де  $\Delta$  – абсолютна шорсткість поверхні труб, мм.

Для сталевих нових труб  $\Delta = 0,06-0,1$  мм, для сталевих труб, що були в експлуатації, з незначною корозією  $\Delta = 0,1-0,2$  мм.

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (2.19)$$

$$Re = \frac{0,5 \cdot 0,021 \cdot 1,107}{0,09 \cdot 10^{-3}} = 129;$$

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{129} \right)^{0,25} = 0,17;$$

$$\Delta P_{TP} = 0,17 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{0,5^2 \cdot 530}{2} = 3218 \text{ Па}.$$

Гідравлічні втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_e^2 \cdot \rho_e}{2}, \quad (2.20)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору. Його знаходять як суму опорів кожного елемента випарника:  $\xi = 2 \cdot \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$  (вхідна і вихідна камери  $\xi_1 = 1,5$ , вхід у труби  $\xi_2 = 0,5$  і вихід із них  $\xi_3 = 1$ , поворот на  $180^\circ$  між ходами  $\xi_4 = 1,4$  [18]).

$$\xi = 2 \cdot 1,5 + 0,5 + 1 + 1,4 = 5,9;$$

$$\Delta P_{TP} = 5,9 \cdot \frac{0,5^2 \cdot 530}{2} = 391 \text{ Па}.$$

Оскільки для крапельних рідин втрати тиску  $\Delta P_y$  мізерно малі, то вони в розрахунок не приймаються ( $\Delta P_y = 0$ ).

Перепад тиску для подолання гідростатичного стовпа рідини дорівнює нулю ( $\Delta P_\Gamma = 0$ ), оскільки випарник не сполучається із навколишнім середовищем.

Повний напір, необхідний для руху середовищ через апарат складе:

$$\Delta P = 3218 + 391 = 3609 \text{ Па}.$$

## 2.4 Вибір допоміжного обладнання

**Розрахунок і вибір збірника для вихідної суміші [16].** Вихідна суміш, яка надходить на ректифікаційний блок для подальшого розділення, попередньо потрапляє у збірник-сховище. За вихідними даними, витрата вуглеводнів, які надходять у проєктований випарник, становить 8000 кг/год. Отже, приймаємо таке припущення, що продуктивність ректифікаційного блоку в цілому за вихідною сумішшю становить 10000 кг/год. Ємність для зберігання вихідної суміші розраховуємо, виходячи з 6–8 годинного резерву робочого часу і з урахуванням коефіцієнта заповнення  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ . Приймаємо  $\psi = 0,82$ .

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>29</b>

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (2.21)$$

де  $G$  – загальна витрата суміші, кг/год.;

$\tau$  – резерв робочого часу,  $\tau = 7$  год.;

$\rho$  – густина вихідної суміші,  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>.

$$V_{EP} = \frac{10000 \cdot 7}{0,82 \cdot 800} = 106,7 \text{ м}^3.$$

Задаємося стандартизованим діаметром ємності  $D = 3,6$  м, тоді її висота складе:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}, \quad (2.22)$$

$$H = \frac{106,7}{0,785 \cdot 3,6^2} = 10,5 \text{ м.}$$

**Розрахунок і вибір насоса для подачі вихідної суміші в ректифікаційну колону [17].** Для всмоктуючого і нагнітального трубопроводів прийемо однако-ву швидкість плинущ рідини, що дорівнює  $w = 2$  м/с.

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.23)$$

де  $V$  – об'ємна витрата вихідної суміші, м<sup>3</sup>/с.

$$d = \sqrt{\frac{3,47 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,047 \approx 0,050 \text{ м.}$$

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}, \quad (2.24)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,050 \cdot 800}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 320000,$$

тобто режим турбулентний. Абсолютну шорсткість трубопроводу приймаємо  $\Delta = 2 \cdot 10^{-4}$  м. Тоді

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,050} = 0,004.$$

Далі отримаємо:

$$\frac{1}{e} = 250; 560 \cdot \frac{1}{e} = 140000; 10 \cdot \frac{1}{e} = 2500;$$

$$Re > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зони, автомодельної по відношенню до  $Re$ :

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}, \quad (2.25)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,004^{0,25} = 0,028.$$

Далі визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої і нагнітальної ліній.

Для всмоктуючої лінії:

1) вхід у трубу (приймаємо з гострими краями)  $\xi_1 = 0,5$ ;

2) 2 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2;$$

$$\Sigma \xi = 0,5 + 2,2 = 2,7.$$

Для нагнітальної лінії:

1) вентиля прямоточні, 2 шт.  $\xi_1 = 2 \cdot 0,65 = 1,3$ ;

2) 3 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ;

3) вихід із труби  $\xi_3 = 1$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3;$$

$$\Sigma \xi = 1,3 + 3,3 + 1 = 5,6.$$

Втрачений напір у всмоктуючій лінії знаходимо за формулою:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.26)$$

де  $l, d_E$  – відповідно довжина і еквівалентний діаметр трубопроводу.

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,028 \cdot \frac{8}{0,050} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,46 \text{ м.}$$

Втрачений напір в нагнітальній лінії:

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,028 \cdot \frac{12}{0,050} + 5,6 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,51 \text{ м.}$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>31</b>

Загальні втрати напору:

$$h_{II} = h_{II.BC.} + h_{II.HAF.}, \quad (2.27)$$

$$h_{II} = 1,46 + 2,51 = 3,97 \text{ м.}$$

Знаходимо напір насоса за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_G + h_{II}, \quad (2.28)$$

де  $(P_2 - P_1)$  – різниця тисків в апараті і в ємності, із якої подається рідина;

$H_G$  – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,1}{800 \cdot 9,81} + 6 + 3,97 = 10,0 \text{ м.}$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{II} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.29)$$

де  $Q$  – подача (витрата),  $Q = 3,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напір насоса.

$$N_{II} = 800 \cdot 9,81 \cdot 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot 10,0 = 272 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку повинен розвивати електродвигун насоса на вихідному валу при сталому режимі роботи:

$$N = \frac{N_{II}}{\eta_{пер} \cdot \eta_n}, \quad (2.30)$$

де  $\eta_n, \eta_{пер}$  – коефіцієнти корисної дії відповідно насоса і передачі від електродвигуна до насоса. Приймаємо  $\eta_n = 0,6$  і  $\eta_{пер} = 1$ .

Отримуємо:

$$N = \frac{272}{1 \cdot 0,6} = 454 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки ЦНС 13-18 з такими параметрами [17]: об'ємна подача насоса  $13 \text{ м}^3/\text{год.}$ ; напір насоса  $18 \text{ м}$ ; потужність, споживана насосом  $2,5 \text{ кВт}$ ; частота обертання  $2200 \text{ об/хв}$ .

### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

#### 3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки

Розрахунок проводимо відповідно до методики, що викладена у [19]. Приймаємо робочий тиск у міжтрубному просторі 0,45 МПа.

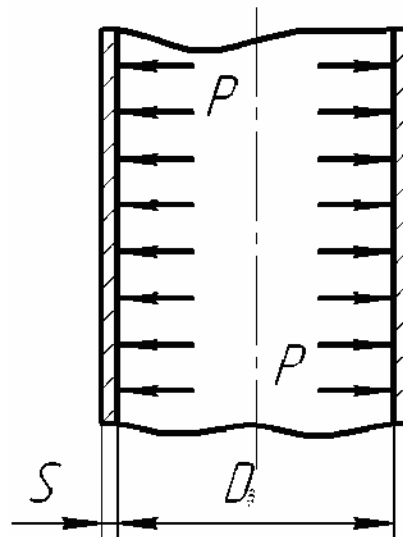


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема циліндричної обичайки

Знаходимо величину нормативного напруження для сталі 16ГС при розрахунковій температурі:  $\sigma^* = 159$  МПа.

Допустиме напруження:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (3.1)$$

де  $\eta = 1$  – поправочний коефіцієнт для листового прокату.

$$[\sigma] = 159 \cdot 1 = 159 \text{ МПа}.$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma_T^{20} = 280$  МПа – межа плинності сталі 16ГС при температурі 20°C.

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 254,5 \text{ МПа}.$$

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

$$P_p = P + P_r, \quad (3.3)$$



де  $P$  – робочий тиск;

$P_r$  – гідростатичний тиск середовища.

Якщо,  $\frac{P_r}{P} \cdot 100 < 5\%$ , то  $P_p = P$  [19].

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_r = g \cdot \rho_{ж} \cdot H_p, \quad (3.4)$$

де  $\rho_{ж}$  – густина рідини в апараті,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$H_p$  – висота стовпа рідини в апараті, м;

$H_p = 0,6$  м.

$$p_r = 9,81 \cdot 800 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} = 0,0047 \text{ МПа};$$

$$\frac{P_r}{P} \cdot 100 = \frac{0,047}{0,45} \cdot 100\% = 1,05\% < 5\% ;$$

$$P_p = 0,45 \text{ МПа} .$$

Оскільки розрахунковий тиск менший за 0,5 МПа, то пробний тиск при гідравлічних випробуваннях визначаємо за рівнянням:

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, 0,2 \right\}, \quad (3.5)$$

де  $[\sigma]_{20} = \sigma^* = 170 \text{ МПа}$  – допустиме напруження сталі 16ГС при температурі  $20^\circ\text{C}$  ( $\eta = 1$ ).

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot 0,45 \cdot 170}{159} = 0,72, 0,2 \right\} = 0,72 \text{ МПа}$$

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_p^{II} = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - P_{II}} \right\}, \quad (3.6)$$

де  $\varphi = 1$  – коефіцієнт міцності зварних швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним або напівавтоматичним зварюванням.

$$s_p^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,45 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 159 - 0,45} = 1,13 \\ \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 254,5 - 0,72} = 1,1 \end{array} \right\} = 1,13 \text{ мм}$$

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_{II} \geq S_p^H + c, \quad (3.7)$$

де  $c$  – добавка до розрахункових товщин конструктивних елементів:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (3.8)$$

$c_1$  – добавка для компенсації корозії та ерозії;

$c_2$  – добавка для компенсації мінусового допуску;

$c_3$  – технологічна добавка.

Приймаємо, що  $c_2 = c_3 = 0$ . Добавку для компенсації корозії та ерозії визначаємо за рівнянням:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau, \quad (3.9)$$

де  $\Pi = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{рік}}$  – проникність матеріалу;

$\tau = 15$  років – термін служби апарату.

$$c = c_1 = 0,12 \cdot 15 = 1,8 \text{ мм}$$

$$s_{II} = 1,13 + 1,8 = 2,93 \text{ мм}$$

Приймаємо  $s_{II} = 4$  мм.

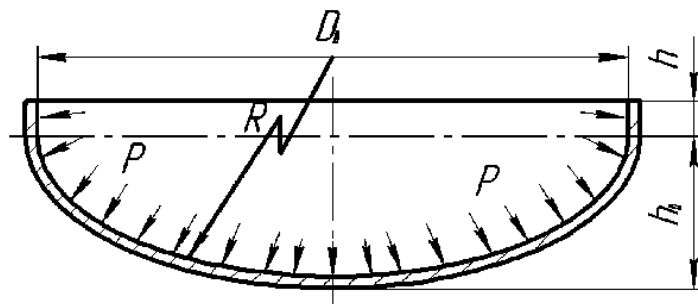


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема еліптичного днища

Розрахункова товщина еліптичного днища:

$$S_p^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_p} \\ \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \end{array} \right\}, \quad (3.10)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$s_p^{\ominus} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,45 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 159 - 0,5 \cdot 0,45} = 1,13 \\ \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 254,5 - 0,5 \cdot 0,72} = 1,13 \end{array} \right\} = 1,13 \text{ мм}$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_{\ominus} \geq S_p^{\ominus} + c, \quad (3.11)$$

$$s_{\ominus} = 1,13 + 1,8 = 2,93 \text{ мм}$$

Приймаємо  $S_{\ominus} = 4 \text{ мм}$ .

## 2.2 Розрахунок опори апарата

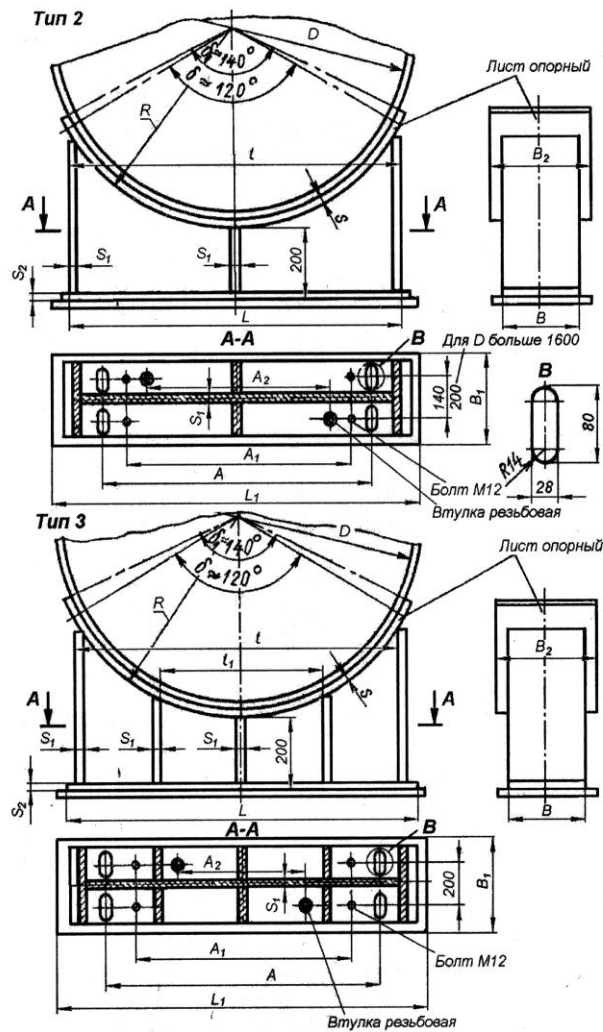


Рисунок 3.3 – Конструктивна схема стандартних сідлових опор

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

Знаходимо масу обичайки кожуха:

$$m_k = \left[ \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot S_{II})^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot H \cdot \rho, \quad (3.12)$$

де  $\rho$  – щільність сталі,  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>.

$$m_k = \left[ \frac{3,14 \cdot (0,8 + 2 \cdot 0,004)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \right] \cdot 6 \cdot 7850 = 476 \text{ кг}.$$

Маса еліптичного днища та кришки відповідно (згідно [19]):

$$m_{\text{Э}} = 1,24 \cdot D^2 \cdot S_{\text{Э}} \cdot \rho, \quad (3.13)$$

$$m_{\text{Эдн}} = 1,24 \cdot 0,8^2 \cdot 0,004 \cdot 7850 = 25 \text{ кг};$$

$$m_{\text{Экр}} = 1,24 \cdot 0,4^2 \cdot 0,004 \cdot 7850 = 6,2 \text{ кг}.$$

Маса труб:

$$m_{\text{тр}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot H \cdot n \cdot \rho, \quad (3.14)$$

$$m_{\text{тр}} = \frac{3,14}{4} (0,025^2 - 0,021^2) \cdot 6 \cdot 82 \cdot 7850 = 558 \text{ кг}.$$

Маса фланця з решіткою:

$$m_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ф}}^2}{4} \cdot h_{\text{ф}} \cdot \rho, \quad (3.15)$$

де  $D_{\text{ф}}$  – зовнішній діаметр фланця, м;

$h_{\text{ф}}$  – висота фланця, м.

$$m_{\text{ф}} = \frac{3,14 \cdot 0,51^2}{4} \cdot 0,05 \cdot 7850 = 157 \text{ кг}.$$

Об'єм міжтрубного простору:

$$V_{\text{мтр}} = f_{\text{мтр}} \cdot H, \quad (3.16)$$

$$V_{\text{мтр}} = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ м}^3.$$

При коефіцієнті заповнення  $\varphi = 0,5$  маса вуглеводневої сировини в апараті складе:

$$m_x = V_{\text{мтр}} \cdot \rho_x \cdot \varphi, \quad (3.17)$$

$$m_x = 1,2 \cdot 530 \cdot 0,5 = 318 \text{ кг}.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>37</b>

Сила тяжіння апарата у робочому стані:

$$G = g \cdot (m_{\kappa} + m_{\text{Эдн}} + m_{\text{Экр}} + m_{\text{тр}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{x}}), \quad (3.18)$$

$$G = 9,81 \cdot (476 + 25 + 6,2 + 558 + 157 + 318) = 15110 \text{ Н}.$$

Приймаємо кількість опор  $n = 2$  шт.

Навантаження на одну опору становитиме:

$$Q = \frac{G}{n}, \quad (3.19)$$

$$Q = \frac{15110}{2} = 7555 \text{ Н}.$$

Остаточно приймаємо стандартну сідлову опору 800-414-2-П, конструктивні розміри якої (умовні позначення див. рис. 6):  $D = 800$  мм;  $R = 414$  мм;  $S_1 = 4$  мм;  $S_2 = 14$  мм;  $L = 1000$ ;  $A = 650$  мм;  $A_1 = 550$  мм;  $A_2 = 400$  мм;  $l = 980$  мм;  $B = 250$  мм;  $L_1 = 1020$  мм; втулка для опори М48;  $S = 6$  мм;  $B_2 = 360$  мм.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>38</b>

## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж розробленого апарата [20]

Випарник бутан-пентанової суміші з паровим простором відноситься до кожухотрубних теплообмінників. Технологія монтажу апаратів такої конструкції залежить від місця і способу їх установки. Вони можуть бути встановлені на відкритому майданчику, на постаменті чи в середині будівлі, а також горизонтально чи вертикально.

У нашому випадку мова йде про горизонтальний апарат, який розміщений на відкритому майданчику на нульовій позначці. Фундаменти виконують у вигляді двох залізобетонних стовпів з анкерними болтами під опори. При монтажі встановлюють нерухому і рухому опори. Гайки на болтах не закручують повністю (залишають зазор 1–2 мм), щоб апарат міг вільно переміщуватись в горизонтальному напрямку. При установці опор, які мають змогу переміщуватися, перевіряють рівномірність прилягання ковзенок до опорних поверхонь і їх перпендикулярність осі апарата. Горизонтальність апарату перевіряють за рівнеміром.

У деяких випадках при монтажі проводять контрольне розбирання (ревізію) кожухотрубних теплообмінників. При цьому перевіряють наявність прокладок, комплектність знімних деталей, правильність їх взаємного розташування.

Для виявлення дефектів у розвальцьовуванні і обварці трубок трубний пучок спресовують (при знятій розподільній камері і кришці) шляхом подачі води в міжтрубний простір. При цьому також оглядають корпус теплообмінника. Дефекти розвальцьовування або обварки усувають.

Горизонтальне обладнання монтують за допомогою одного або двох (спарених) кранів. Спосіб підйому і вантажопідйомність кранів вибирають в залежності від розміру і маси обладнання, висоти і конфігурації фундаменту або постаменту під обладнання, наявності розташованих поруч будівельних конструкцій та ін.

Горизонтальні апарати особливо великої маси і при підйомі на значну висоту часто монтують за допомогою двох кранів. Монтаж починають з підйому апарата із вихідного горизонтального положення без відриву його від землі. На рис. 4.1 показані найбільш сприятливі умови роботи кранів при монтажі апаратів.

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

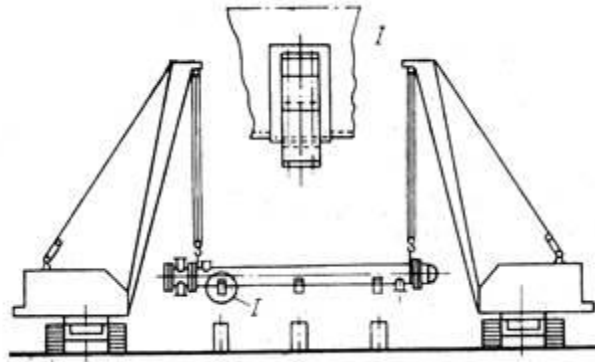


Рисунок 4.1 – Схема монтажу горизонтального теплообмінника за допомогою двох кранів

Коли установка одного з кранів із зовнішньої сторони фундаментів неможлива, монтаж апаратів виконують лише маневруванням стріли крана. У тих випадках, коли при підйомі апаратів неможливо розташувати крани із зовнішньої сторони фундаментів і проїхати між фундаментами, збільшують виліт стріли кранів або переміщують крани з піднятим апаратом у межах їх вантажної характеристики.

#### 4.2 Ремонт апарата [20]

Теплообмінники із трубною системою мають підвищену надійність, що дозволяє їм функціонувати без збоїв протягом довгих років. Але не варто забувати, що планове технічне обслуговування просто необхідне для профілактики поломок. Циркулюючий теплоносій з часом засмічує стінки трубок, осідаючи на їх поверхні та перешкоджаючи вільному потоку. Уникнути передчасного виходу обладнання із ладу та зберегти ефективність дозволить регулярне очищення трубочатки. Завдяки систематичному промиванню є можливість тривалий час підтримувати робочі параметри у нормі. Безпосередньо ремонт кожухотрубних теплообмінників, у більшості випадків, необхідний лише у разі надмірного зношення обладнання.

Найбільш поширеними дефектами поламаних теплообмінників є наступні:

##### 1. Виривання трубок із трубних решіток.

Дана проблема зазвичай виникає через нерівномірне розширення трубок та корпусу. Варіанти вирішення: зачистка місця розриву і обварювання трубки заново; висвердлювання трубки і установка нової трубки; зачистка і заглушка трубки.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>40</b>

Якщо встановлюються заглушки на дефектні трубки, необхідно враховувати, що опір даної ділянки зростає, а також трохи погіршується теплообмін. Зазвичай, теплообмінники розраховують таким чином, щоб без сильного впливу на технологічний процес можна було загнушити до 10 % трубок. У кожному разі це питання треба вивчати окремо.

### *2. Наскрізна корозія трубок.*

Дана проблема виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при неправильно підбраному матеріалі трубочатки. Варіанти вирішення: висвердлювання трубки і установка нової трубки; зачистка і загнушка трубки.

Так само, як і в описаному вище випадку, при встановленні загнушок необхідно дотримуватись вимог з урахуванням збільшеного опору. Із огляду на причини виникнення наскрізної корозії, можна припустити, що із великою ймовірністю, найближчим часом можуть почати виходити із ладу іншу трубки.

Нерідко при виникненні наскрізної корозії найбільш ефективним шляхом є просто заміна трубного пучка (виготовлення нового трубного пучка). Це особливо актуально, якщо повторний дефект виник швидко після першої поломки.

### *3. Наскрізна корозія корпусу чи камери.*

Дана проблема, так само як і наскрізна корозія трубок, зазвичай виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при неправильно підбраному матеріалі.

Варіанти вирішення: підварювання або установка заплатки; виготовлення нової камери чи корпусу.

### *4. Засмічення трубок чи міжтрубного простору.*

Ця проблема може виникнути в тому випадку, якщо один із теплоносіїв не фільтрується належним чином, або якщо відбувається поява природного нагару (наприклад, при роботі з вихлопними газами).

Варіанти вирішення: механічне очищення; хімічне очищення.

Якщо засмічення відбувається через відсутність належної фільтрації середовищ, рекомендується установка необхідних фільтрів. Якщо ж відбувається поява нагару, швидше за все, це обумовлено технологічними моментами. У такому

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>41</b>



випадку треба визначати, коли відбувається чергове засмічення теплообмінника (вимірювання температури або протитиску) і чистити його.

Подібні роботи слід проводити на місці експлуатації. У разі необхідності фахівці повинні виїхати на місце і провести цю роботу, але в більшості випадків ці операції виробляє експлуатаційний персонал.

#### *5. Покриття вапном (накипом) чи іншими відкладеннями.*

Ця проблема може виникнути в тому випадку, якщо один з теплоносіїв є рідина (вода) з невідповідним для даного процесу хімічним складом (наприклад, надмірно мінералізована). Варіанти вирішення: очистка за допомогою спеціальних хімічних засобів.

У разі появи великого шару мінеральних відкладень (накипу) хімічне очищення може бути неефективним. У такому випадку трубний пучок не підлягатиме ремонту і буде необхідно виготовити новий трубний пучок.

Дефектні штуцера і трубні решітки при досягненні максимальних величин зносу і прогину замінюються.

Свищі і тріщини усуваються шляхом заварки або постановкою накладок з попереднім видаленням дефектної ділянки.

За допомогою кольорової дефектоскопії визначають протяжність і положення кінців тріщин, виявлених в корпусі. Ці кінці до заварки засвердлюють свердлами діаметром 3–4 мм. Некрізні тріщини глибиною не більше 0,4 товщини стінки розправляються під заварку односторонньою вирубкою на максимальну глибину тріщини зі зняттям крайок під кутом 50–60°. При тріщині понад 100 мм зварювання проводять оберненоступеневим методом. Наскрізні і некрізні тріщини глибиною більше 0,4 товщини стінки обробляють на всю товщину вирубкою зубилом або газорізкою. При появі гніздових тріщин пошкоджені місця вирізають і закривають латками без гострих кутів. Латки вваривать в рівень з основним металом. Площа латки не повинна перевищувати площі листа апарату.

Надійність ліквідації поверхневих дефектів контролюють магнітною або ультразвуковою дефектоскопією. Допускається глибина пошкодження в межах 10–20 % товщини стінки в залежності від розмірів ушкодження.

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

## 5 Охорона праці

**Явища, що виникають при стіканні електричного струму в землю. Напруга кроку та дотику [21, 22].**

Небезпека ураження людини електричним струмом багато в чому визначається явищами, що виникають під час стікання електричного струму на землю.

Стікання струму в землю відбувається тільки через провідник, що перебуває з нею в безпосередньому контакті. Такий контакт може бути випадковим чи навмисним. В останньому випадку провідник чи група з'єднаних між собою провідників, що у контакті із землею, називається заземлювачем.

**Причинами стікання струму в землю є:**

- замикання струмопровідної частини на заземлений корпус електроустановки;
- падіння дроту на землю;
- використання землі у якості дроту тощо.

Стікання струму в землю супроводжується виникненням не тільки на заземлювачі, але і в землі навколо заземлювача, а отже, і на поверхні землі деяких потенціалів.

Також необхідно знати, від чого залежать значення цих потенціалів, як вони змінюються при змінах відстані до заземлювача, тобто знати рівняння потенційної кривої.

Одиночний провідник, що у контакті із землею, називається одиночним заземлювачем. Одиночні заземлювачі розрізняються формою, розмірами та способами здійснення контакту із землею.

**Розподіл потенціалів на поверхні землі (потенційна крива) має свої особливості для:**

- кульового заземлювача, що у землі на великій глибині;
- кульового заземлювача поблизу поверхні землі;
- півкульового заземлювача;
- стрижневого заземлювача;
- дискового заземлювача.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>43</b>

Потенційна крива заземлювача будь-якої форми на відносно великій від нього відстані (порівняно з розмірами заземлювача) наближається до потенційної кривої півкульового заземлювача.

За умовами безпеки обслуговуючого персоналу заземлення має мати порівняно малий опір, забезпечити який можна шляхом збільшення геометричних розмірів одиночного заземлювача (електрода) або застосуванням кількох паралельно з'єднаних електродів, іменованих груповим заземлювачем.

Використовуючи груповий заземлювач, можна вирівняти потенціал на території, де розміщуються заземлювальні електроди, що у ряді випадків відіграє вирішальну роль у забезпеченні безпеки обслуговуючого персоналу.

Розподіл потенціалу на поверхні землі при використанні групового заземлювача та значення потенціалу самого групового заземлювача (електродів) залежить від кількості використовуваних електродів, їх форми та розмірів, а також від відстані між електродами:

- розподіл потенціалу на поверхні землі при нескінченно великих відстанях між електродами;
- розподіл потенціалу на поверхні землі при малих відстанях між електродами;
- потенційна крива найпростішого групового заземлювача;
- потенціал групового заземлювача.

**Опір заземлювача розтіканню струму.** Струм, що проходить через заземлювач у землю, долає опір, званий опором заземлювача розтіканню струму або просто опором розтікання.

Воно має три доданки:

- опір самого заземлювача;
- перехідний опір між заземлювачем і ґрунтом (тобто контактний опір між поверхнею заземлювача та прилеглими до неї частинками землі);
- опір ґрунту.

Два перших доданків у порівнянні з третім малі, тому під опором заземлювача розтіканню струму розуміють опір ґрунту розтіканню струму.

Оскільки щільність струму в землі на відстані більше 20 м від заземлювача практично дорівнює нулю, можна вважати, що опір струму, що стікає, надає лише відповідний об'єм землі; для одиночного заземлювача – це півсфера радіусом 20 м. Однак, при різних формах і розмірах заземлювача опір цього обсягу землі по-різному.

Тому висловлювання для обчислення опорів розтіканню струму одиночних заземлювачів різної форми мають свої особливості:

- опір розтіканню струму одиночного шарового заземлювача;
- опір розтіканню струму півкульового заземлювача;
- опір розтіканню струму одиночних заземлювачів інших типів.

До цих пір, розглядаючи явища стікання струму в землю, ми вважали, що земля у всьому своєму об'ємі однорідна, тобто в будь-якій точці має однаковий

Опір групового заземлювача розтіканню струму залежить від кількості електродів, що входять до складу групового, їх власних опорів розтіканню струму та відстані між електродами:

- опір групового заземлювача розтіканню струму на відстані між електродами більше 40 м;
- опір групового заземлювача розтіканню струму на відстані між електродами менше 40 м;
- коефіцієнт використання групового заземлювача.

Працюючи в діючих електроустановках завжди існує певна ймовірність потрапляння людини під дію електричного струму. Ця ймовірність може бути меншою або більшою залежно від різних факторів. Але в будь-якому випадку при оцінці дії струму на людину визначаються значення:

- напруги дотику;
- напруги кроку.

**Напруга дотику.** Відповідно до нормативних документів напруга дотику – це напруга між двома провідними частинами або між провідною частиною та землею при одночасному дотику до них людини чи тварини.

Тобто напругою дотику (для людини) називається напруга між двома точками ланцюга струму, яких одночасно торкається людина, або падіння напруги в опорі тіла людини.

Оскільки напруга дотику залежить від значення потенціалу заземлювача та від характеру його потенційної кривої, небезпека для людини буде різною при використанні різних типів одиночних заземлювачів та групових заземлювачів:

- напруга дотику при одиночному заземлювачі;
- напруга дотику при груповому заземлювачі.

**Напруга дотику з урахуванням падіння напруги в опорі основи, на якій стоїть людина.** Струм, що стікає в землю через людину, що стоїть на землі, підлозі або іншій підставі, долає опір не тільки тіла людини, а й цієї підстави, вірніше, тих її ділянок, з якими мають контакт подошви ніг людини (опір взуття в даному випадку до уваги не приймається).

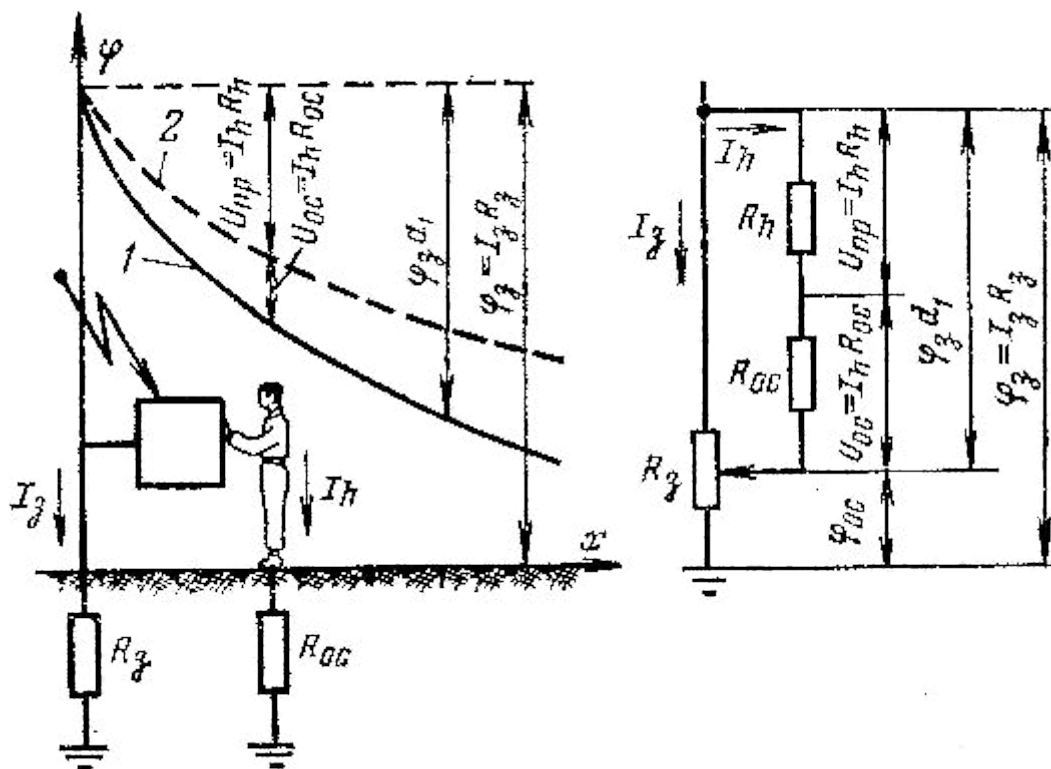


Рисунок 5.1 – До визначення напруги дотику з урахуванням падіння напруги в опорі розтіканню струму основи, на якій стоїть людина: 1 – потенційна крива; 2 – крива, що характеризує зміну  $U_{np}$  зі зміною відстані від заземлювача

Опір основи, на якій стоїть людина, правильніше називати (аналогічно опорі заземлювача) опором розтіканню струму основи ніг. Часто цей опір називають також опором розтіканню струму основи або опором розтіканню струму ніг людини.

Усі положення, розглянуті вище, справедливі для випадків, коли опір розтіканню підстави, на якій стоїть людина, дорівнює нулю. У дійсних умовах цей опір не дорівнює нулю і часом буває досить великий.

**Напруга кроку.** Напругою кроку називається напруга між двома точками ланцюга струму, що знаходяться одна від одної на відстані кроку, що приймається рівним 1 м, на яких одночасно стоїть людина, або, інакше кажучи, падіння напруги в опорі тіла людини.

У сфері захисних пристроїв від ураження струмом (заземлення, занулення та інших) інтерес представляють насамперед напруги між точками на поверхні землі (чи іншої підстави, на якій стоїть людина) у зоні розтікання струму із заземлювача. Без урахування опорі розтіканню струму основи напругою кроку буде різниця потенціалів у двох точок на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані  $x$  і  $(x + a)$  від заземлювача та на відстані кроку  $a$  одна від одної і на яких стоїть людина (рис. 5.2).

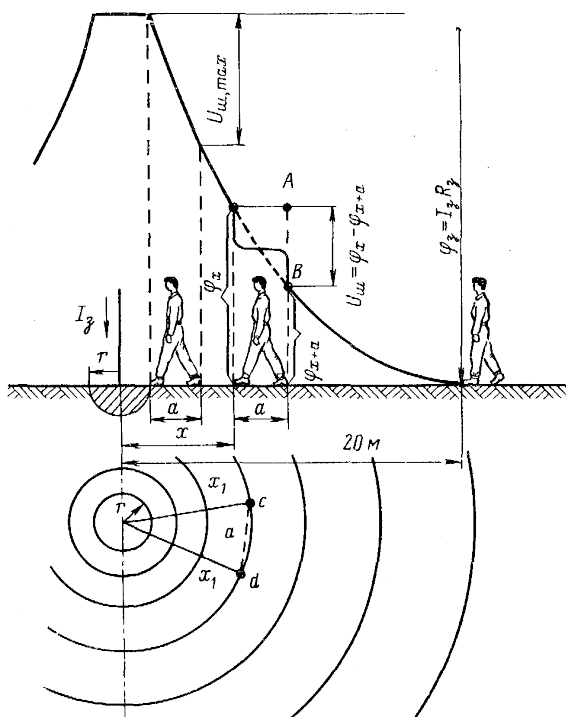


Рисунок 5.2 – Напруга кроку при одиночному заземлювачі

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Напруга кроку визначається відрізком  $AB$  (див. рис. 5.2), довжина якого залежить від форми потенційної кривої, тобто від типу заземлювача, та змінюється від максимального значення до нуля зі зміною відстані від заземлювача:

- напруга кроку при одиночному заземлювачі;
- напруга кроку при груповому заземлювачі.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>48</b>

## Список літератури

1. Технологические расчеты установок переработки нефти : Учеб. пособие для вузов / М. А. Танатаров, М. Н. Ахметшина, Р. А. Фасхутдинов [и др.]. – Москва : Химия, 1996. – 352 с.
2. Каталитический крекинг. Катализаторы, химия и кинетика / Под ред. Н. С. Печуро. – Москва : Химия, 1990. – 150 с.
3. Маньковский О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств: Инженерные методы расчета / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. – Ленинград : Химия, 1976. – 368 с.
4. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.
5. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1972. – 494 с.
6. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
7. Пентан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wikipedia.org>
8. Бутан (речовина) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wikipedia.org>
9. Водяна пара [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wikipedia.org>
10. Лашинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
11. Лашинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лашинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.

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



13. Кузнецов А.А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности / А.А. Кузнецов, С.М. Кагерманов, Е.Н. Судаков. – Л. : Химия, 1974 – 344 с.

14. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии / Р.Т. Эмирджанов, Р.А. Лемберанский . – М. : Химия, 1989. – 192 с.

15. Врагов А. П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: Навчальний посібник / А. П. Врагов, Я. Е. Михайловський, С. І. Якушко. – За ред. А. П. Врагова. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 170 с.

16. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.

17. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

18. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

19. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов втузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.

20. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 312 с.

21. Явища при стіканні струму в землю [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://ftemk.mpei.ac.ua/bgd/\\_private/U\\_pr\\_sh.htm](http://ftemk.mpei.ac.ua/bgd/_private/U_pr_sh.htm)

22. Рогач І. М. Охорона праці в лікувально-профілактичних та санаторних закладах : Навчально-методичний посібник / І. М. Рогач, Р. І. Шніцер, С. П. Козодаєв. – Ужгород : Ужгородський національний університет, 2011. – 38 с.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>50</b>