

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

## **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до бакалаврської роботи на тему:

«Установка ректифікації суміші бензол-бутиловий спирт  
продуктивністю 7,45 т/год. по вихідній суміші з розробкою холодильника  
кубового залишку»

Студент групи ОХП-14з

Медведев О.М.

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота на тему:

«Установка ректифікації суміші бензол-бутиловий спирт продуктивністю 7,45 т/год. по вихідній суміші з розробкою холодильника кубового залишку»

Листів – 104, ілюстрацій – 10, таблиць – 5, посилань – 19.

Об'єктом дослідження в даній роботі виступає основне апаратне устаткування, що використовується в процесі розділення (ректифікації) бінарної суміші. Це устаткування досить складне, дороге і в основному працює з пожежовибухонебезпечними та шкідливими речовинами. Тому проектування даного обладнання – це дуже відповідальний процес, який потребує досить глибоких знань не лише з розрахунку і конструювання апаратів, але й технології виробництва, техніки безпеки та інше.

Отже, бакалаврська робота, за своєю суттю, є узагальненням теоретичних і практичних знань з курсу предметів, які викладаються як на кафедрі «Машинознавства та обладнання промислових підприємств», так і на інших кафедрах університету, і спрямована не лише на їх закріплення, а ще й на удосконалення навичок самостійної роботи.

Дана робота складається з вступу, восьми розділів, висновку та переліку використаної літератури. В ній приводиться загальне пояснення процесу ректифікації, описується конструкція колонного та теплообмінного обладнання. За вихідними даними проведений розрахунок ректифікаційної колони, її основних параметрів і характеристик. З урахуванням потрібної площі охолодження теплоносія був розроблений холодильник кубового залишку.

ПЕРЕГОНКА, РЕКТИФІКАЦІЯ, РЕКТИФІКАЦІЙНА КОЛОНА, ТЕПЛООБМІННИК, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ФЛЕГМОВЕ ЧИСЛО, КІНЕТИЧНА КРИВА, ХОЛОДИЛЬНИК КУБОВОГО ЗАЛИШКУ, ОБИЧАЙКА, ПЛАВАЮЧА ГОЛОВКА, ДЕФЕКТ.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$G_W$  – продуктивність по кубового залишку, кг/год;

$G_p$  – продуктивність по дистилляту, кг/год;

$G_F$  – продуктивність по вихідній суміші, кг/год;

$a_F$  – масова концентрація низько киплячого компонента у вихідній суміші, %(мас.);

$a_p$  – масова концентрація низько киплячого компонента в дистилляті, %(мас.);

$a_W$  – масова концентрація низько киплячого компонента в кубовій остачі, %(мас.);

$X$  – концентрація низько киплячого компонента А в бінарній суміші, мол. частки;

$M_A, M_B$  – молярна маса компонента А и В (відповідно), кг/кмоль;

$R_{min}$  – мінімальне флегмове число;

$K_R$  – коефіцієнт надлишку флегми;

$R$  – дійсне флегмове число;

$X_{cp}^H$  – середня мольна концентрація низько киплячого компонента в нижній частині колони, %(мол.);

$X_{cp}^B$  – середня мольна концентрація низько киплячого компонента у верхній частині колони, %(мол.);

$X_{cp}$  – середня мольна концентрація низько киплячого компонента по колоні, %(мол.);

$a_{cp}$  – середня масова концентрація по колоні, %(мас.);

$t_{x\ cp}^H$  – середня температура в нижній частині колони, °С;

$t_{xW}$  – температура кубового залишку, °С;

$t_{xF}$  – температура вихідної суміші, °С;

$t_{x\ cp}^B$  – середня температура у верхній частині колони, °С;

$t_{xP}$  – температура дистилляту, °С;

$t_{xF}$  – температура вихідної суміші, °С;

$t_{x\text{ ср}}$  – середня температура по колоні, °С;  
 $M_{x\text{ ср}}$  – середня мольна маса, кг/кмоль;  
 $\rho_{x\text{ ср}}$  – середня щільність рідкої фази, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_A$  – щільність компонента А при температурі  $t_{x\text{ ср}}$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_B$  – щільність компонента В при температурі  $t_{x\text{ ср}}$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu_{x\text{ ср}}$  – середня в'язкість, Па·с;  
 $\mu_A$  – динамічний коефіцієнт в'язкості компонента А, Па·с;  
 $\mu_B$  – динамічний коефіцієнт в'язкості компонента В, Па·с;  
 $\sigma_{x\text{ ср}}$  – середнє поверхове натяжіння, Н/м;  
 $\sigma_A$  – поверхневий натяг компонента А, Н/м;  
 $\sigma_B$  – поверхневий натяг компонента В, Н/м;  
 $D_{x(t)}$  – коефіцієнт дифузії при середній температурі, м<sup>2</sup>/с;  
 $D_{x(20)}$  – коефіцієнт дифузії при  $t = 20$  °С, м<sup>2</sup>/с;  
 $V_A$  – мольний об'єм компонента А, см<sup>3</sup>/моль;  
 $V_B$  – мольний об'єм компонента В, см<sup>3</sup>/моль;  
 $Y_{\text{ ср}}^{\text{H}}$  – середня мольна концентрація низько киплячого компонента в нижній частині колони, %(мол.);  
 $Y_{\text{ ср}}^{\text{В}}$  – середня мольна концентрація низько киплячого компонента у верхній частині колони, %(мол.);  
 $Y_{\text{ W}}$  – мольна концентрація низько киплячого компонента в кубовому залишку, %(мол.);  
 $Y_{\text{ F}}$  – мольна концентрація низько киплячого компонента у вихідній суміші, %(мол.);  
 $Y_{\text{ P}}$  – мольна концентрація низько киплячого компонента в дистилаті, %(мол.);  
 $Y_{\text{ ср}}$  – середня мольна концентрація низько киплячого компонента по колоні, %(мол.);  
 $t_{y\text{ ср}}$  – середня температура по колоні, °С;  
 $t_{y\text{ ср}}^{\text{В}}$  – середня температура у верхній частині колони, °С;  
 $t_{y\text{ ср}}^{\text{H}}$  – середня температура в нижній частині колони, °С;

$M_{y\text{cp}}$  – середня мольна маса, кг/кмоль;  
 $\rho_{y\text{cp}}$  – середня щільність, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu_{y\text{cp}}$  – середня в'язкість, Па·с;  
 $\mu_{yA}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості компонента А, Па·с;  
 $\mu_{yB}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості компонента В, Па·с;  
 $u_D$  – коефіцієнт дифузії для парової фази, м<sup>2</sup>/с;  
 $D_k^H$  – діаметр колони в нижньому перерізі, м;  
 $u_w$  – швидкість пару, м/с;  
 $\beta_{xf}$  – коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі, кмоль/(м<sup>2</sup>·с·кмоль/кмоль);  
 $Pr$  – дифузійний критерій Прандтля;  
 $\beta_{yf}$  – коефіцієнт масовіддачі в паровій фазі, кмоль/(м<sup>2</sup>·с·кмоль/кмоль);  
 $Re_y$  – критерій Рейнольдса;  
 $H_{\text{кол}}$  – висота колони, м;  
 $n$  – число дійсних тарілок у колоні;  
 $h$  – відстань між тарілками, м;  
 $H_{\text{сеп}}$  – висота сепараційної частини колони, м;  
 $H_{\text{куб}}$  – висота кубової частини колон, м;  
 $\Delta P_k$  – гідравлічний опір ректифікаційної колони, Па;  
 $\Delta P_T$  – гідравлічний опір тарілки, Па;  
 $W_0$  – швидкість пару в отворах тарілки, м/с;  
 $\zeta$  – коефіцієнт опору, що залежить від вільного перетину отворів;  
 $d_0$  – діаметр отворів, м;  
 $h_{\text{пер}}$  – висота переливу, м;  
 $L$  – витрата рідкої фази, м<sup>3</sup>/год;  
 $l_{\text{сл}}$  – довжина зливного борту, м;  
 $m$  – коефіцієнт витрати через перелив;  
 $d$  – діаметр штуцера, м;  
 $V_{\text{ф}}$  – об'ємна продуктивність потоку, м<sup>3</sup>/с;  
 $W_{\text{ф}}$  – швидкість руху потоку, м/с;  
 $C_F$  – питома теплоємність вихідної суміші, Дж/кг·К;

$C_p$  – питома теплоємність дистилляту при його середній температурі, Дж·кг·К;

$C_w$  – питома теплоємність кубового залишку при його середній температурі, Дж·кг·К;

$G_{г.п.}$  – продуктивність по вихідній суміші, кг/с;

$r$  – питома теплота пароутворення;

$F$  – поверхня теплообміну, м<sup>2</sup>;

$Q$  – кількості тепла, передане від одного носія іншому, Вт;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;

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

$Q_d$  – кількість тепла, що віддається охолоджувальній воді при конденсації парів у дефлегматорі, Вт;

$G_v$  – витрата охолодної води, кг/с;

$r_p$  – питома теплота паротворення дистилляту, кДж/кг;

$C_v$  – питома теплоємність води, Дж/кг·К;

$t_k$  – кінцева температура охолодної води, °С;

$t_{п.}$  – початкова температура охолодної води, °С;

$t_{p \text{ кін}}$  – кінцева температура дистилляту після холодильника, °С;

$Q_k$  – кількість тепла, яку треба подати в куб колони, Вт;

$P_k$  – тиск у сосуді під час дії запобіжного клапана, МПа;

$P_p$  – розрахунковий тиск без урахування гідростатичного тиску, МПа;

$P_r$  – гідростатичний тиск, МПа;

$\rho_c$  – щільність середовища в апараті, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$H$  – висота середовища в апараті, м;

$P$  – розрахунковий тиск, МПа;

$P_{пр}$  – пробний тиск, МПа;

$P_v$  – розрахунковий тиск в умовах випробування, МПа;

$\phi$  – коефіцієнт міцності зварених швів;

$C$  – прибавка до розрахункової товщини, мм;

$C_1$  – прибавка для компенсації корозії та ерозії, мм;  
 $C_2$  – прибавка для компенсації мінусового допуску, мм;  
 $C_3$  – прибавка технологічна, мм;  
 $\Pi$  – швидкість проникнення корозії, мм/рік;  
 $\tau$  - термін служби апарата, років;  
 $C_e$  - прибавка для компенсації ерозії, мм;  
 $S_p$  – розрахункова товщина стінки обичайки, мм;  
 $S$  – виконавча товщина стінки обичайки, мм;  
 $[P]$  – допустимий внутрішній надлишковий тиск, МПа;  
 $S_{1p}$  – розрахункова товщина стінки днища, мм;  
 $S_1$  – виконавча товщина стінки днища, мм.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД .....	13
1.1 Перегонка рідини.....	13
1.2 Апаратурне оформлення процесів перегонки рідини.....	14
1.3 Конструкції теплообмінного обладнання .....	16
2 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ, КОНСТРУКЦІЇ КОЛОНИ ТА ТЕПЛООБМІННИКА .....	17
2.1 Опис технологічної схеми та конструкції колони .....	17
2.2 Опис конструкції холодильника .....	21
3 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕПЛООБМІННИКА .....	23
4 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ .....	25
4.1 Визначення продуктивності за дистиллятом та кубовим залишком .....	25
4.2 Визначення мінімального та дійсного числа флегми .....	26
4.3 Визначення середніх значень параметрів колони, фізико-хімічних та термодинамічних констант фаз .....	31
4.4 Визначення діаметру колони.....	36
4.5 Визначення висоти колони .....	37
4.6 Визначення гідравлічного опору колони з сітчастими тарілками .....	42
4.7 Тепловий розрахунок .....	45
4.7.1 Підігрівник вихідної суміші.....	45
4.7.2 Дефлегматор (конденсатор) .....	47
4.7.3 Холодильник дистилляту .....	48
4.7.4 Холодильник кубового залишку.....	50
4.7.5 Кип'ятильник.....	51
4.8 Визначення діаметра штуцерів .....	53
4.9 Вибір товщини стінки корпусу колони .....	56
4.10 Розрахунок та вибір ємностей установки .....	56
5 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ХОЛОДИЛЬНИКА .....	58
5.1 Вихідні дані .....	58
5.2 Розрахунок на міцність теплообмінника.....	58
5.3 Розрахунок кожуха теплообмінника .....	64



5.4 Визначення товщини трубної решітки .....	65
6 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ХОЛОДИЛЬНИКА .....	67
6.1 Виготовлення обичайок .....	67
6.2 Виготовлення днищ .....	69
6.3 Виготовлення трубної решітки .....	70
6.4 Встановлення штуцерів .....	71
6.5 Процес збирання теплообмінника .....	72
6.6 Випробування теплообмінника після виготовлення .....	73
7 РЕМОНТ ХОЛОДИЛЬНИКА .....	76
7.1 Метод виконання планово-попереджувального ремонту .....	76
7.2 Зупинка апарата в ремонт .....	78
7.3 Основні дефекти, які виикають при експлуатації апарата та методи їх усунення .....	79
8 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ .....	85
ВИСНОВКИ .....	101
ЛІТЕРАТУРА .....	102

## ВСТУП

У багатьох хімічних виробництвах оброблювані матеріали або кінцеві продукти часто являють собою суміші рідин, які необхідно розділяти на складові частини. Найпоширенішим методом поділу сумішей рідини, а також зріджених сумішей газів на складові частини є перегонка (дистиляція й ректифікація), застосовувана в різних варіантах.

Перегонка має важливе значення в хімічній технології, особливо у зв'язку з розвитком безперервних процесів. Перегонка являє собою процес, у якому поділювана рідка суміш нагрівається до кипіння, а пара, що утворюється, відбирається й конденсується. У результаті одержують рідину, сполуку якої відрізняється від сполуки первісної суміші. Повторюючи багато разів процеси випару й конденсації, можна майже повністю розділити суміш на чисті складові частини.

Процес перегонки рідких сумішей заснований на тому, що рідини, що становлять суміш, мають різну летючість, тобто при одній і тій же температурі мають різну пружність пар. Склад пари, а, отже, і склад рідини, що виходить при конденсації пари, буде трохи відрізнятися від сполуки початкової суміші; легколетючого компонента в парі буде втримуватися більше, ніж у рідині, що переганяється. Перегонці піддають розчини, у яких розчинник і розчинена речовину мають летючість, внаслідок чого в парі перетворюються одночасно й розчинник і розчинена речовина в кількостях, що відповідають їхній летючості. При перегонці відбувається повний або частковий поділ розчину на складові його компоненти, причому в більшості випадків кінцевими продуктами є й відгін (дистилят) і залишок, що не перетворився в пару.

Застосовувані способи перегонки можуть бути в основному розбиті на дві групи:

- 1) проста перегонка, включаючи перегонку під вакуумом, перегонку з водяною парою й сублімацію (сублімацію);
- 2) ректифікація.

Проста перегонка застосовується для поділу сумішей, що являють собою легколетючу речовину зі змістом домішки нелетючих або досить важколетючих речовин.

Ректифікація – широко розповсюджений спосіб найбільш повного поділу сумішей летучих рідин, частково або цілком розчинних одна в одній. Ректифікація являє собою перегонку, яка супроводжується взаємодією пари, що піднімаються, зі стікаючою їй на зустріч рідиною (флегмою), отриманої при частковій конденсації пари.

Найпростішими способами перегонки рідких сумішей, як це вказувалося вище, є:

- 1) часткове випаровування рідини й конденсація отриманої пари з відводом конденсату (проста перегонка);
- 2) часткова конденсація пари суміші, що переганяється, з відводом конденсату (проста конденсація).

Кожний із цих процесів окремо не приводить до одержання досить чистих продуктів, але, здійснюючи обидва ці процеси одночасно й багаторазово в колонах, можна досягти поділу рідкої суміші на чисті компоненти. Процес ректифікації здійснюється в протиточних апаратах - колонах: пари рідини, що переганяється, протікають знизу нагору, назустріч парам звернувши вниз протікає рідина, що подається у верхній елемент колони. Між рідкою й паровою фазами виникає масообмін, внаслідок якого пари в міру їх просування по колоні збагачуються легколетючим компонентом, а рідина – менш летучим компонентом. В остаточному підсумку пар, що виходить із верхньої частини колони, являє собою більш-менш чистий легколетучий компонент, конденсація якого дає готовий продукт - дистилят, а з нижньої частини колони випливає порівняно чистий менш летучий компонент, так званий кубовий залишок, який, так само, як і дистилят, може бути кінцевим продуктом перегонки. Рідину, що надходить на зрошення колони, називають флегмою; її одержують шляхом конденсації пар, що піднімаються з верхньої частини колони, у спеціальних конденсаторах - дефлегматорах. Для утворення

пари нижній елемент колони гріють пристосуваннями у вигляді зміювиків або трубчаток, у які й підводять необхідна кількість тепла, у більшості випадків з водяною парою, що гріє. Ступінь поділу рідкої суміші на складові її компоненти й чистота одержуваних дистиляту й кубового залишку залежать від того, наскільки розвинена поверхня фазового контакту, а останнє визначається кількістю зрошуваної рідини - флегми й конструктивним оформленням апарата.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

## 1.1 Перегонка рідини

У харчовій, нафтохімічній, хімічній і багатьох інших галузях промисловості часто виникає необхідність розділяти складні однорідні рідкі суміші (розчини) на окремі чисті компоненти або на фракції, збагачені окремими компонентами. Характерними прикладами таких процесів є розділення водно-спиртових розчинів, органічних сполук, нафти на окремі продукти і фракції, зрідженого повітря або зрідженого природного газу на окремі корисні компоненти.

Для розділення складних однорідних рідких сумішей на індивідуальні компоненти або окремі збагачені фракції широкого поширення набули процеси дистиляції і ректифікації.

Дистиляцією (від лат. *distillatio*) називають процес розділення рідкої однорідної суміші на окремі фракції шляхом часткового випаровування рідини і конденсації пари, що при цьому утворилася. У результаті проведення процесу випаровування і конденсації пари одержують збагачену легкокиплячим компонентом (ЛКК) рідину - дистилят і збагачену висококиплячим компонентом (ВКК) частину рідкої суміші, що не випарувалася - кубовий залишок. У вітчизняній літературі, як аналог методу дистиляції, часто використовують термін перегонка - процес перерозподілу компонентів між рідкою і паровою фазами при зміні параметрів процесу (складу рідини, температури і тиску).

Перегонка вперше була використана алхіміками для очищення рідин і одержання з вина етилового спирту, а вже потім вона набула дуже широкого застосування як метод первинної переробки нафти.

Дистиляцію звичайно використовують для попереднього, відносно грубого методу розділення рідкої суміші на окремі фракції, збагачені деякими компонентами. Залежно від складу вихідної суміші і вимог до продуктів

розділення, розрізняють просту (одноразову) і складну - багаторазову дистиляцію. Проте використання дистиляції не дозволяє одержувати практично чисті речовини.

Більшого поширення в різноманітних технологіях розділення складних однорідних розчинів набула ректифікація.

Ректифікацією називають процес розділення рідких сумішей на практично чисті компоненти шляхом застосування методу багаторазової (багатоступінчастої) протічній дистиляції, проведеної в ректифікаційній колоні. Ректифікація забезпечує повніше, в порівнянні з простою перегонкою, розділення, дає чистіші кінцеві продукти, але вимагає великих витрат праці і енергії.

Спосіб розділення суміші на компоненти шляхом ректифікації є основним технологічним прийомом в таких галузях промисловості, як переробка нафтопродуктів, спиртна промисловість, промисловість отримання запашних речовин. Існує декілька модифікацій цього способу. Процеси перегонки здійснюються головним чином як періодичні, тоді як ректифікація, особливо для багатотоннажних виробництв, в основному проводиться по схемі, що безперервно діє.

## 1.2 Апаратурне оформлення процесів перегонки рідини

Схему та апаратурне обладнання фракційної перегонки дивись рис. 1.1.

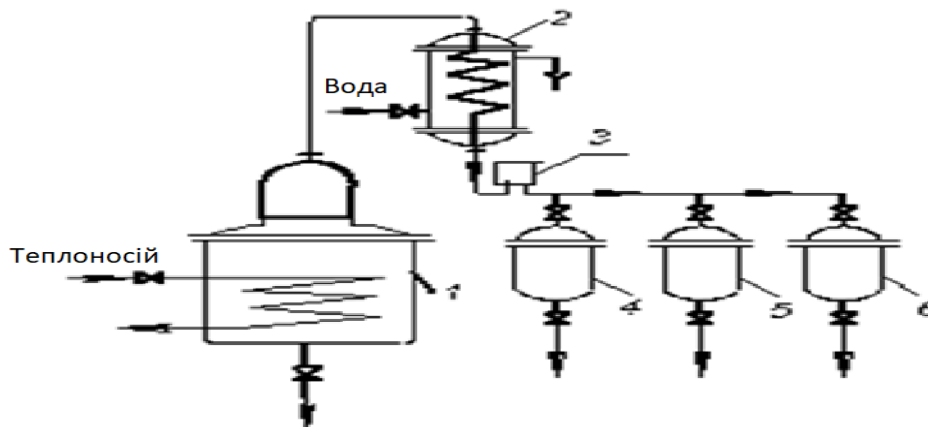


Рисунок 1.1 - Схема установки для фракційної перегонки:

1 – перегонний куб; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – оглядовий ліхтар; 4–6 – збірники фракцій дистилляту

Ректифікація, як і інші процеси масообміну, протікає на поверхні розділу фаз, тому апарати для ректифікації повинні забезпечувати розвинену поверхню контакту між паровою й рідкою фазою. Схему та апаратурне обладнання ректифікації безперервної дії дивись рис. 1.2.

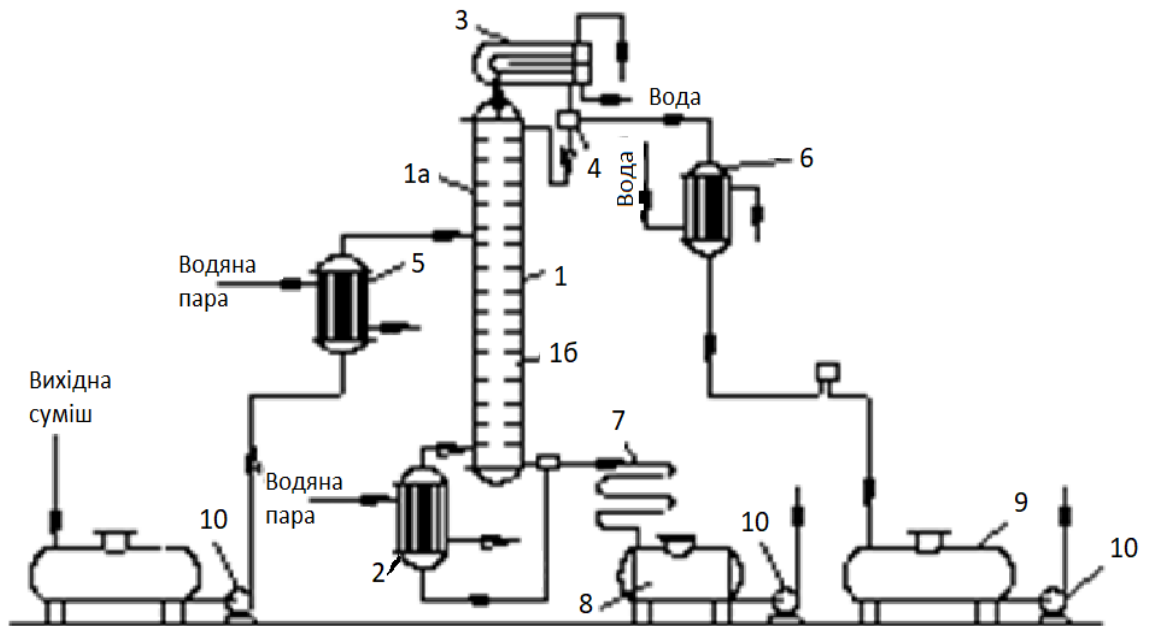


Рисунок 1.2 - Схема безперервно діючої установки ректифікації:

1 – ректифікаційна колона (1а – зміцнювальна частина; 1б – вичерпна частина); 2 – кип’ятильник; 3 – дефлегматор; 4 – дільник флегми; 5 – підігрівач початкової суміші; 6 – холодильник дистилляту або холодильник-конденсатор; 7 – холодильник кубового залишку; 8, 9 – збірники; 10 – насоси

Для проведення процесів ректифікації застосовуються апарати колонного типу. По характеру взаємодії паровий і рідкої фаз ректифікаційні колони можна розділити на дві основні групи: - зі східчастим (дискретним) контактом фаз; - з безперервним контактом фаз. Ректифікаційні колони з безперервним контактом фаз - у цих колонах рідина стікає у вигляді плівки – або по поверхні насадки (насадочні колони), або по внутрішній або зовнішній поверхні вертикальних труб (плівкові й роторно-плівкові апарати), а пара у

вигляді суцільного потоку піднімається нагору через вільний об'єм насадки усередині вертикальних труб. Ректифікаційні колони зі східчастим контактом фаз – являють собою колони, усередині яких на певній відстані один від одного по висоті колони розміщують горизонтальні перегородки – тарілки. Тарілки служать для розвитку поверхні контакту фаз при спрямованому русі цих фаз (рідина тече зверху вниз, а пара проходить у вигляді пухирців або струмків знизу нагору) і багаторазовій взаємодії рідини й пари.

### **1.3 Конструкції теплообмінного обладнання**

В будь-якій схемі перегонки обов'язково повинно бути теплообмінне обладнання. За конструкцією воно поділяється на: апарати з поверхнею теплообміну, виготовлюваною з труб (кожухотрубчасті, “труба в трубі”, зрошувальні, повітряного охолодження, занурювальні змійовикові); апарати, поверхня теплообміну яких виконується з листового прокату (пластинчасті, спіральні) та апарати, виготовлені з неметалевих матеріалів. Для процесу ректифікації найпоширенішими є кожухотрубчасті теплообмінники.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати класифікуються таким чином:

– за призначенням – теплообмінники (Т), холодильники (Х), конденсатори (К) та випарники (И);

– за конструкцією – апарати з нерухомими трубними решітками (тип Н), температурним компенсатором на кожусі (тип К), з розширником на кожусі (з нерухомими трубними решітками і температурним компенсатором на кожусі), з плаваючою головкою (тип П), U-подібними трубами (тип У) та для підвищених тисків і температур (тип ПК);

– за розташуванням у просторі – вертикальні (В) і горизонтальні (Г);

– за числом ходів у трубному просторі – одноходові та багатходові;

– за компонованням – одинарні та здвоєні;

– за матеріальним виконанням – основні вузли і деталі з вуглецевої, низьколегованої, корозійностійкої сталі, латуні та титану.



## 2 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ, КОНСТРУКЦІЇ КОЛОНИ ТА ТЕПЛООБМІННИКА

### 2.1 Опис технологічної схеми та конструкції колони

Колона ректифікації та холодильник кубового залишку є складовими частинами апаратурного оформлення процесу ректифікації. Вони відносяться до основного обладнання.

Технологічна схема ректифікаційної установки представлена на рис. 1.2. До її складу входять: 1 – ректифікаційна колона (1а – зміцнювальна частина; 1б – вичерпна частина); 2 – кип'ятильник; 3 – дефлегматор; 4 – дільник флегми; 5 – підігрівач початкової суміші; 6 – холодильник дистиляту або холодильник-конденсатор; 7 – холодильник кубового залишку; 8, 9 – збірники; 10 – насоси.

Установка працює наступним чином. Ректифікаційна колона 1 має циліндричний корпус, усередині якого встановлено контактні пристрої у вигляді тарілок. Від низу до верху колоною рухається пара, що надходить у нижню частину апарата з кип'ятильника 2, який знаходиться ззовні колони, тобто є виносним (як показано на рис. 1.2), або розміщується безпосередньо під колоною. Отже, за допомогою кип'ятильника створюється висхідний потік пари.

Пара конденсується в дефлегматорі 3, що охолоджується водою, і одержувана рідина розділяється в дільнику 4 на дистилят і флегму, яка прямує на верхню тарілку колони. Отже, за допомогою дефлегматора в колоні створюється низхідний потік рідини.

Рідина, що надходить на зрошування колони (флегма), є майже чистим ЛКК. Проте, стікаючи колоною і взаємодіючи з парою, рідина збагачується ВКК, що конденсується з пари.

Коли рідина досягає нижньої тарілки, вона стає практично чистим ВКК і надходить в кип'ятильник, що обігрівается глухою парою або іншим теплоносієм.

На деякій відстані від верху колони до рідини з дефлегматора приєднується початкова суміш, яка надходить на так звану живлячу тарілку колони. Для того, щоб зменшити теплове навантаження кип'ятильника, початкову суміш зазвичай заздалегідь нагрівають в підігрівачі 5 до температури кипіння рідини на живлячій тарілці.

У дефлегматорі 3 може бути сконденсована або вся пара, що надходить з колони, або тільки частина її, відповідно до кількості флегми, що повертається в колону. В першому випадку частина конденсату, що залишається після відокремлення флегми, є дистилятом (ректифікат), або верхнім продуктом, який після охолодження в холодильнику 6 прямує в збірник дистиляту 9. У другому випадку несконденсована в дефлегматорі пара водночас конденсується і охолоджується в холодильнику 6, який за такого варіанта роботи є конденсатором-холодильником дистиляту.

Рідина, що виходить з низу колони (наближена за складом до ВКК), також поділяється на дві частини. Одна частина, як вказано вище, прямує в кип'ятильник, а інша – залишок (нижній продукт) після охолодження водою в холодильнику 7 прямує в збірник 8.

На рис. 1.2 наведено тільки принципову схему безперервно діючої установки ректифікації. Такі установки оснащуються необхідними контрольно-вимірювальними і регулювальними приладами, що дають можливість автоматизувати їх роботу і проводити процес за допомогою програмного керування в оптимальних умовах. Автоматичним регулюванням зводяться до мінімуму коливання кількості, складу і температури початкової суміші, а також тиску, витрати гріючої пари і охолоджувальної води.

Колона (рис. 2.1) призначена для проведення масообмінних процесів між взаємодіючими фазами. Колона складається з 1 - верхня (концентраційна)

частина колони; 2 - нижня (відгінна) частина колони; 3 - конденсатор-дефлегматор; 4 - кип'ятильник-випарник.

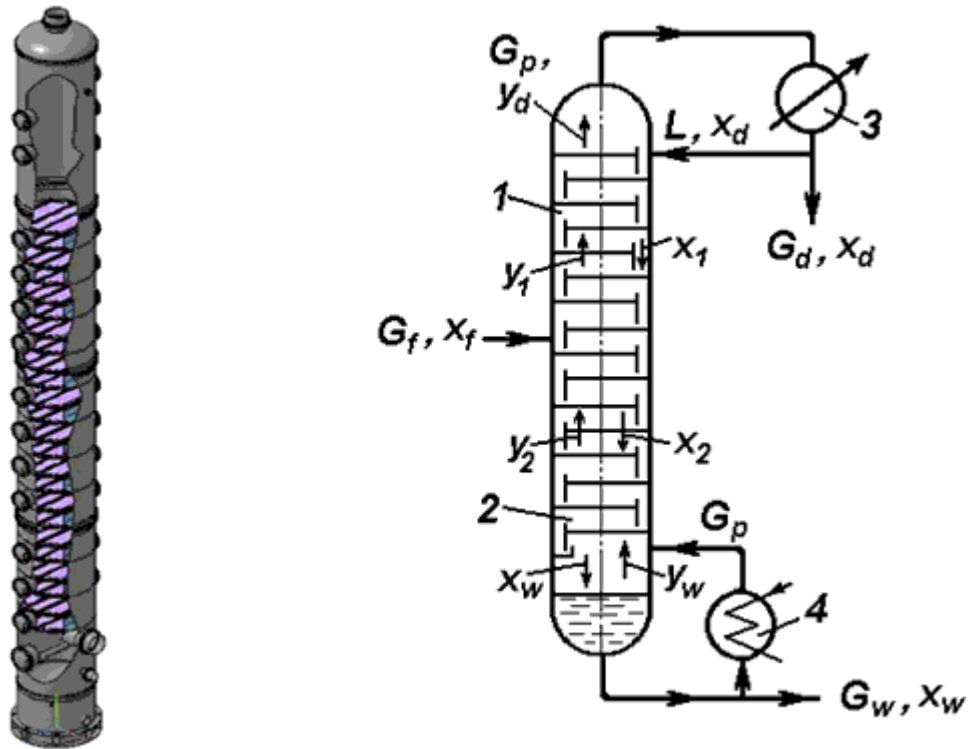


Рисунок 2.1 - Схема роботи ректифікаційної колони для розділення бінарної суміші: 1 - верхня (концентраційна) частина колони; 2 - нижня (відгінна) частина колони; 3 - конденсатор-дефлегматор; 4 - кип'ятильник-випарник

Ректифікаційна колона являє собою вертикальний циліндричний апарат, що закритий зверху кришкою і знизу днищем. По висоті колони на певній відстані одна від другої встановлені масообмінні контактні пристрої - тарілки.

Колона безперервної дії складається із двох частин: верхньої - зміцнювальної (концентраційної) 1 і нижньої - вичерпної (відгінної) 2.

Початкова суміш надходить до колони звичайно підігрітою до температури кипіння та подається на тарілку живлення, розташовану в середній частині між нижньою і верхньою колоною. Пара, що утворюється при кипінні, піднімається вгору по колоні та контактує з рідиною, що стікає зверху

вниз. Під час руху пари із середньої частини колони у верхню частину відбувається процес поступового збагачення парової фази низькокиплячим компонентом. Висококонцентрована парова фаза виводиться із колони в конденсатор - дефлегматор 3, отриманий в результаті конденсації конденсат частково виводиться як готовий продукт - дистилат, а частково подається на верхню тарілку колони у вигляді флегми.

Подача флегми на верхню тарілку колони забезпечує в колоні сталість складу фаз, що взаємодіють на контактних елементах верхньої колони. При перетіканні флегми з тарілки на тарілку зверху вниз відбувається збіднення рідини низькокиплячим компонентом і збагачення висококиплячим компонентом.

На тарілці живлення досягаються концентрації речовини у фазах, що дорівнюють концентраціям початкової суміші.

У нижній кубовій частині колони відбувається процес вилучення (відгону) низькокиплячого компонента в парову фазу з початкової суміші. Цей процес проходить за рахунок тепломасообміну між потоками стікаючої рідини і пари, що утворюється у нижній частині колони при випаровуванні рідини та піднімається вгору. Випаровування частини кубової рідини (ВКК) відбувається у виносному кип'ятильнику - випарнику 4 у результаті подачі в нього гарячого теплоносія. Пари ВКК, що утворилися, подаються під нижню тарілку відгінної частини колони, контактують з рідиною, що стікає зверху, при цьому рідина кипить на тарілці та створює висхідний потік пари ВКК відповідної концентрації при температурі кипіння рідини на тарілці.

Отже, ректифікаційна колона являє собою тепломасообмінний апарат, у якому по висоті колони знизу вгору на тарілках знижується температура кипіння рідини від максимальної в кубовій частині до мінімальної на верхній тарілці концентраційної колони. Унизу колони температура практично дорівнює температурі кипіння ВКК при відповідному тиску в колоні, на верхній тарілці колони температура практично дорівнює температурі кипіння ЛКК. На кожній тарілці колони встановлюється відповідна концентрація

компонентів у рідині та відповідна температура кипіння рідини. Параметри роботи колони залежать від властивостей розділюваної суміші, тиску в колоні, типу контактних пристроїв і режиму роботи тарілки в певних гідродинамічних умовах.

## **2.2 Опис конструкції холодильника**

Холодильник кубового залишку зображено на рис. 2.2. Він призначений для охолодження залишку, що вилучається з нижньої частини колони і далі надходить у ємність-сховище. Так як різниця температур теплоносіїв становить більше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то використовувати теплообмінники типу Н і К не можна, бо через велику різницю температурних розширень трубного пучка і корпусу в апараті будуть виникати великі напруження. Тому в нашому випадку холодильник – це горизонтальний двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник з плаваючою головкою. Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з плаваючою головкою (тип П) застосовуються при практично необмеженій різниці температур труб і кожуха, а також в тому випадку, якщо необхідна чистка зовнішньої (при розміщенні теплообмінних труб по вершинам квадратів) та внутрішньої поверхонь труб. В цих апаратах можлива також заміна пошкоджених труб. Апарат складається з корпусу 1, трубного пучка 2, розподільної камери 3, кришки розподільної камери 4, кришки 5 та плаваючої головки 6. Теплообмінник обладнується штуцерами для підведення та відведення робочих середовищ, бобишками для спорожнення трубного та міжтрубного просторів, а також бобишками, які встановлюються в нижніх та верхніх точках відповідних порожнин. Горизонтальний апарат встановлюється на сідлових опорах, одна з яких нерухома, а друга – рухома (ковзна).

Теплообмінник працює наступним чином. У трубний простір апарата подається кубовий залишок, який треба остудити. Так як в даному випадку використовується протитечійна схема руху теплоносіїв, то в протихід у

міжтрубний простір подається охолоджуюча вода. Передача тепла від одного теплоносія (кубовий залишок) до іншого (охолоджуюча вода) відбувається через тверду стінку. Безпосередній контакт теплоносіїв відсутній.

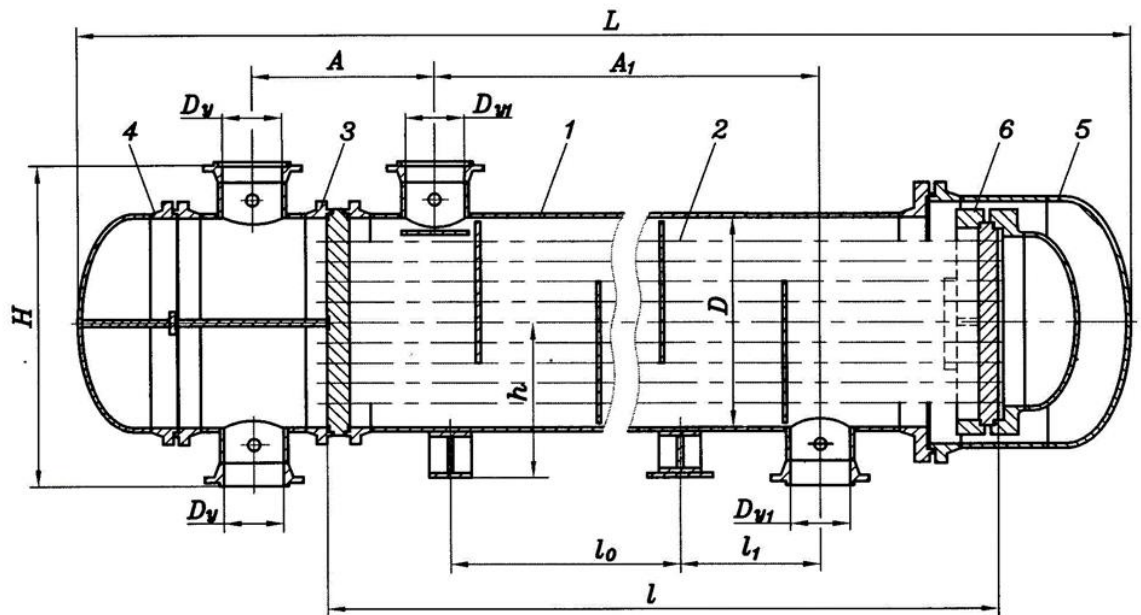


Рисунок 2.2 - Кожухотрубчастий теплообмінник з плаваючою головкою горизонтальний двоходовий по трубам: 1 - корпус, 2 - трубний пучок, 3 - розподільна камера, 4 - кришка розподільної камери, 5 – кришка, 6 - плаваюча головка

### **3 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕПЛООБМІННИКА**

Конструкція апарата розробляється, виходячи із основних технічних вимог, що пред'являються до апарата, та умов, при яких апарат буде експлуатуватись.

До числа основних вимог відносяться: призначення апарата і робоче середовище, технічні вимоги (теплове навантаження, поверхня теплообміну, та т.п.), параметри технологічного процесу (тиск та температура), а також надійність, економічність та безпечна робота.

При конструюванні теплообмінного обладнання необхідно максимально використовувати стандартизовані та нормалізовані вузли та деталі.

Починати конструювання необхідно з вибору конструкційного матеріалу, який має відповідати основним вимогам технологічного процесу, що відбувається в апараті, а саме: робоче середовище, тиск та температура. При конструюванні завжди треба прагнути до економії конструкційного матеріалу, до зменшення маси деталей, вузлів усього апарата, враховуючи вимоги надійності та безпечності, які є головними критеріями при оцінці якості вибраної конструкції.

Хімічні продукти в тій чи іншій мірі завжди викликають корозію матеріалу апарату, тому для виготовлення їх застосовуються різні метали (залізо, чавун, алюміній) і їх сплави. Найбільше застосування знаходять сталі. Завдяки здатності змінювати свої властивості залежно від складу, можливості термічної і механічної обробки сталі з низьким змістом вуглецю добре штамнуються, але погано обробляються різанням. Додатки інших металів - легуючих елементів - покращують якість сталей і додають їм особливі властивості (наприклад, хром покращує механічні властивості, зносостійкість і корозійну стійкість; нікель підвищує міцність, пластичність; кремній збільшує жаростійкість).

Вибір конструкційного матеріалу для кожної складової частини теплообмінного апарата (кришки, трубна решітка, трубний пучок і т. п.) проводиться із умов необхідної хімічної стійкості; умов міцності при заданій температурі та тиску; з урахуванням вартості матеріалу, його недефіцитності та технології виготовлення.

Згідно з [12] швидкість корозії в бутиловому спирті:

- вуглецевої сталі до 1 мм/рік;
- леговані сталі < 0,1 мм/рік.

Отже для тих частин апарату, де протікає бутиловий спирт, приймаємо матеріали з легованої сталі. В порівнянні з вуглецевою сталлю, при однаковому терміні служби, це дає нам можливість значно знизити товщини матеріалів, з яких складається теплообмінник, а отже і його масу.

Таким чином доцільно, щоб у трубний простір подавався кубовий залишок, а усі елементи, з якими він контактує, були виготовлені з легованої сталі. Інші елементи апарата для здешевлення виготовляються з вуглецевої сталі.

Для кожної складової частини теплообмінника підібрані свої конструкційні матеріали, які заносимо до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Конструкційні матеріали для виготовлення теплообмінника

Корпус (кожух)	Сталь 20
Трубний пучок	09Г2С
Розподільна камера	09Г2С
Кришка розподільної камери	09Г2С
Кришка	Сталь 20
Плаваюча головка	09Г2С



## 4 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ

### Вихідні дані для розрахунку:

- бінарна суміш	бензол - бутиловий спирт;
- продуктивність по вихідній суміші	$G_F = 7,45$ т/год.;
- зміст НКК:	
- у вхідній суміші	$a_F = 42,0$ % мас.;
- у дистилляті	$a_P = 98,5$ % мас.;
- у кубовому залишку	$a_W = 2,0$ % мас.;
- температура:	
- вхідної суміші	$30,0$ °С;
- дистилляту після холодильника	$26,0$ °С;
- кубового залишку після холодильника	$26,0$ °С;
- остигнутої води	$10,0$ °С;
- тиск пари, що гріє	$5,4$ атм.;
- коефіцієнт надлишку флегми	$1,9$ .

### 4.1 Визначення продуктивності за дистиллятом та кубовим залишком

Продуктивність колони ректифікації за дистиллятом визначають за формулою:

$$G_P = G_F \cdot \frac{a_F - a_W}{a_P - a_W}, \quad (4.1)$$

де  $G_P$  – витрата дистилляту, кг/с;

$G_F$  – витрата вхідної суміші, що подається на поділ, кг/с;

$a_F$  – зміст НКК в вхідній суміші, % мас.;

$a_P$  – зміст НКК в дистилляті, % мас.;

$a_W$  – зміст НКК в кубовому залишку, % мас.

$$G_P = 7450 \cdot \frac{0,42 - 0,02}{0,985 - 0,02} = 3088,08 \text{ кг/год} = 0,858 \text{ кг/с.}$$

Продуктивність колони за кубовим залишком визначають із рівняння:

$$G_W = G_F - G_P. \quad (4.2)$$

$$G_W = 7450 - 3088,08 = 4361,92 \text{ кг/ч} = 1,212 \text{ кг/с.}$$

Перевірка:

$$7450 \cdot 0,42 = 3088,08 \cdot 0,985 + 4361,92 \cdot 0,02$$

$$3129 = 3041,76 + 83,24$$

$$3129 = 3129$$

#### 4.2 Визначення мінімального та дійсного числа флегми

Перераховуємо масові концентрації в мольні за формулою:

$$X = \frac{\frac{a}{M_A}}{\frac{a}{M_A} + \frac{1-a}{M_B}}, \quad (4.3)$$

де  $X$  – концентрація низькокиплячого компонента А в бінарній суміші, мол. частка;

$a$  – зміст низькокиплячого компонента А в бінарній суміші, мас. частка;

$M_A, M_B$  – молярна маса компонента А і В (відповідно).

Молярні маси:

- бензол – 78 кг/кмоль;
- бутиловий спирт – 74 кг/кмоль.

Тоді концентрація вихідної суміші:

$$X_F = \frac{\frac{a_F}{M_A}}{\frac{a_F}{M_A} + \frac{1-a_F}{M_B}} = \frac{\frac{0,42}{78}}{\frac{0,42}{78} + \frac{1-0,42}{74}} = 0,407;$$

дистилята:

$$X_P = \frac{\frac{a_P}{M_A}}{\frac{a_P}{M_A} + \frac{1 - a_P}{M_B}} = \frac{\frac{0,985}{78}}{\frac{0,985}{78} + \frac{1 - 0,985}{74}} = 0,984;$$

кубового залишка:

$$X_W = \frac{\frac{a_W}{M_A}}{\frac{a_W}{M_A} + \frac{1 - a_W}{M_B}} = \frac{\frac{0,02}{78}}{\frac{0,02}{78} + \frac{1 - 0,02}{74}} = 0,019.$$

Мінімальне число флегми визначають графоаналітичним способом. Для цього на основі дослідних даних [2, 9], див. табл. 4.1, в координатах у–х будують рівноважну криву для суміші бензол – бутиловий спирт при атмосферному тиску (рис. 4.1) та криву залежності температур кипіння та конденсації від складу рідини та пари (рис. 4.2). Рівноважні дані для бінарних сумішей наведено в табл. 1 Додатку А [17].

Таблиця 4.1 - Рівноважні дані для суміші бензол - бутиловий спирт

Вміст компонента А, мол. %		Температура кипіння, t, °C
у рідині (x)	у парі (y)	
0	0,0	117,7
5	22,3	110,8
10	42,5	105,5
20	62,5	97,7
30	72,1	92,5
40	78,8	88,3
50	83,5	85,4
60	85,4	83,5
70	88,5	81,9
80	90,7	81,3
90	94,7	80,7
100	100	80,1

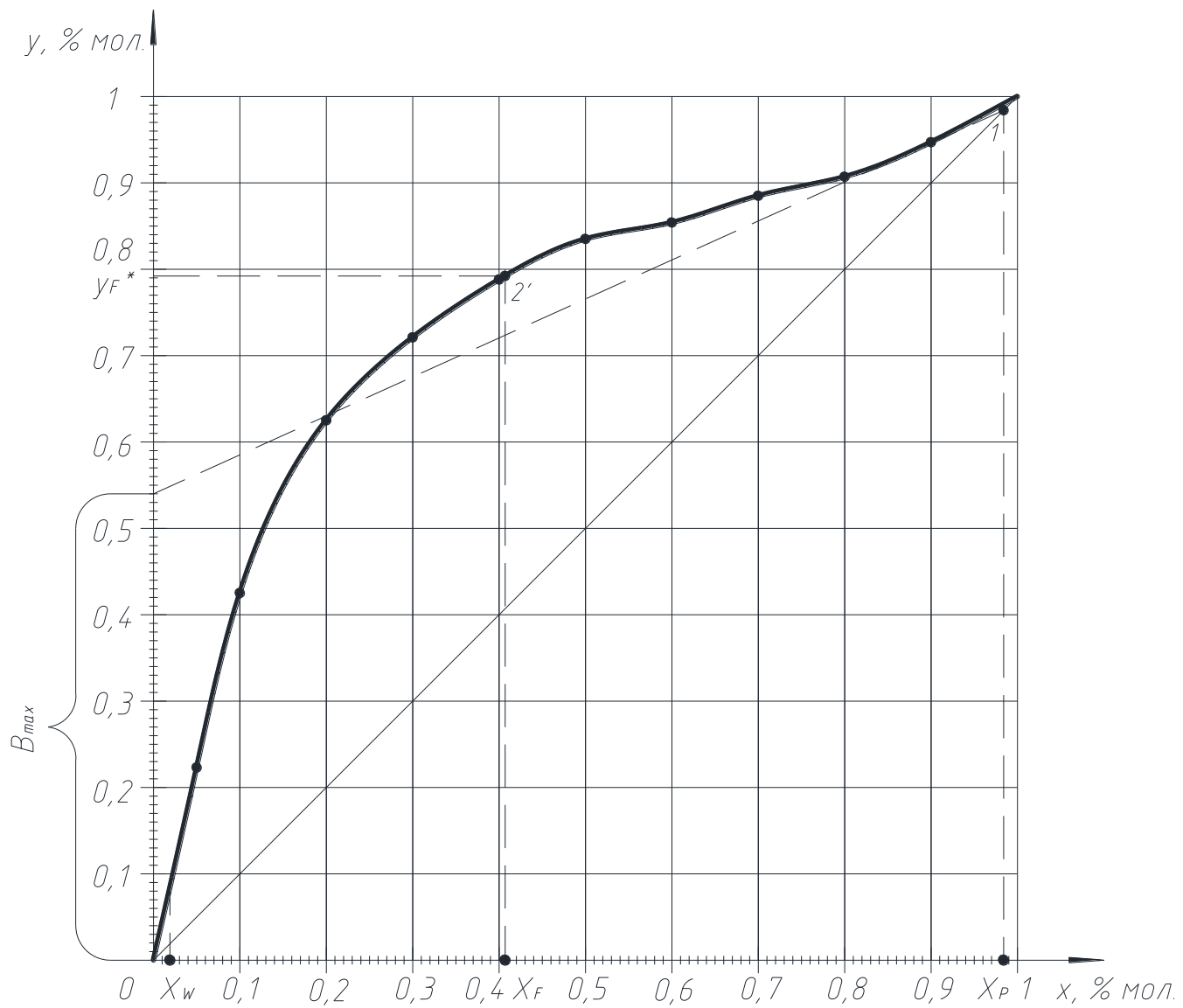


Рисунок 4.1 – До визначення мінімального флегмового числа на діаграмі  $y - x$ .

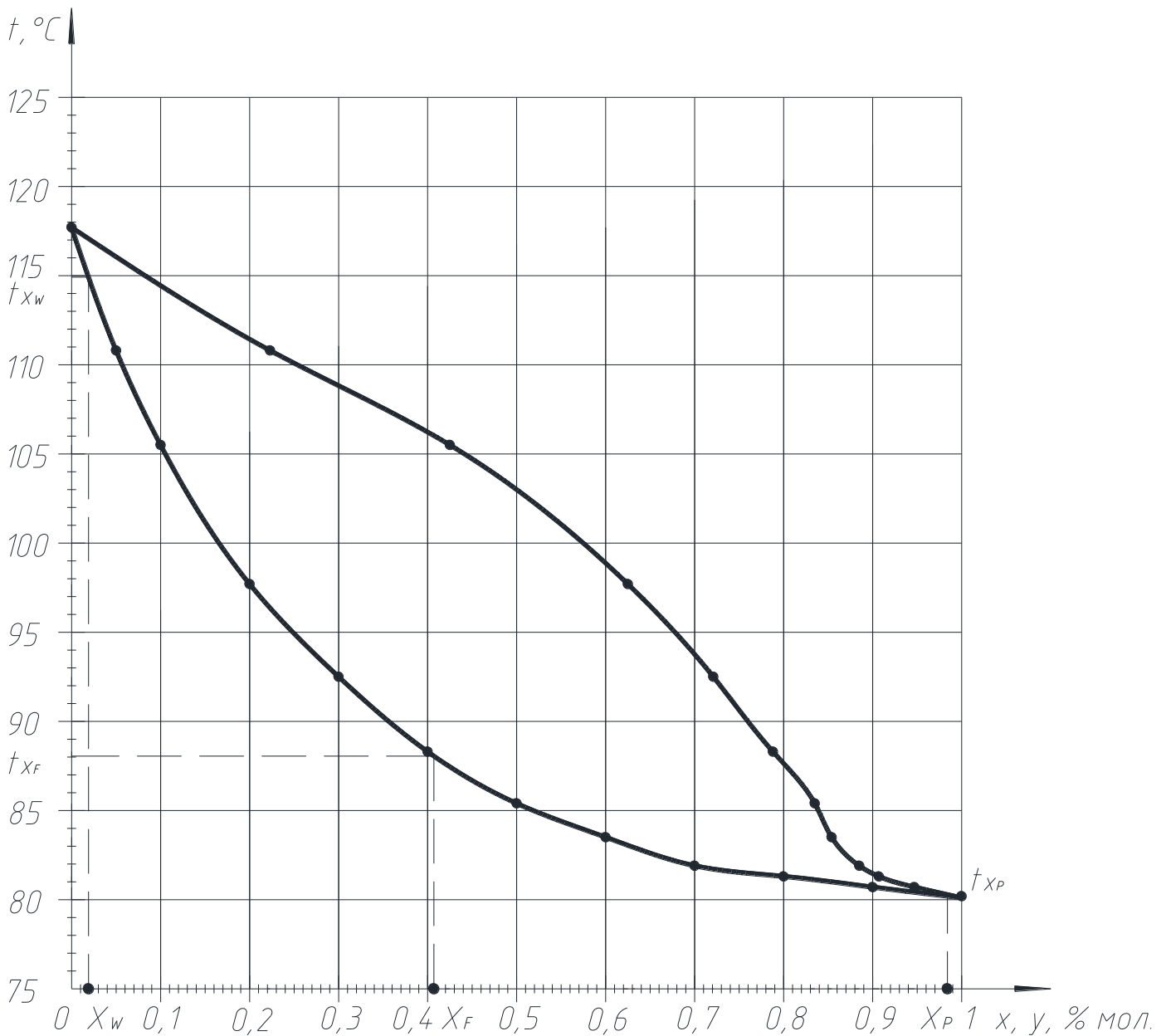


Рисунок 4.2 – Діаграма залежності температури кипіння та конденсації від складу рідини та пари ( $t - x, y$ )

На діаграмі  $y - x$  з точки 1 ( $x_p = y_p$ ) проводимо пряму лінію, дотичну до кривої рівноваги, до перетину з віссю  $y$ . Відрізок, який відсікає пряма лінія на вісі  $y$ , позначаємо через  $B_{max} = 0,54$ . За величиною цього відрізка знаходимо мінімальне флегмове число:

$$R_{min} = \frac{x_p}{B_{max}} - 1. \quad (4.4)$$

$$R_{min} = \frac{0,984}{0,54} - 1 = 0,82.$$

Якщо урахувати заданий коефіцієнт надлишку флегми  $K_R$ , можна знайти робоче (дійсне) флегмове число

$$R = K_R \cdot R_{min}, \quad (4.5)$$

де  $K_R$  – коефіцієнт надлишку флегми.

$$R = 1,9 \cdot 0,82 = 1,558.$$

На діаграмі  $y - x$  наносимо лінії робочих концентрацій (робочі лінії) для робочого флегмового числа  $R = 1,558$  (рис. 4.3). Для цього на вісі ординат  $Oy$  відкладаємо відрізок

$$B = \frac{x_P}{R + 1}, \quad (4.6)$$

$$B = \frac{0,984}{1,558 + 1} = 0,385,$$

кінець якого з'єднують з точкою 1, яка має координати  $(x_P = y_P)$ . Точку перехрестя цієї прямої з вертикальною лінією, яка установлена в точці  $x_F$  вісі абсцис, позначають точкою 2, що має координати  $(x_F, y_F)$ . Та, кінець кінцем, точку 2 з'єднують с точкою 3  $(x_W = y_W)$ . Лінії 1-2 та 2-3 є відповідно робочими лініями для верхньої та нижньої частин ректифікаційної колони.

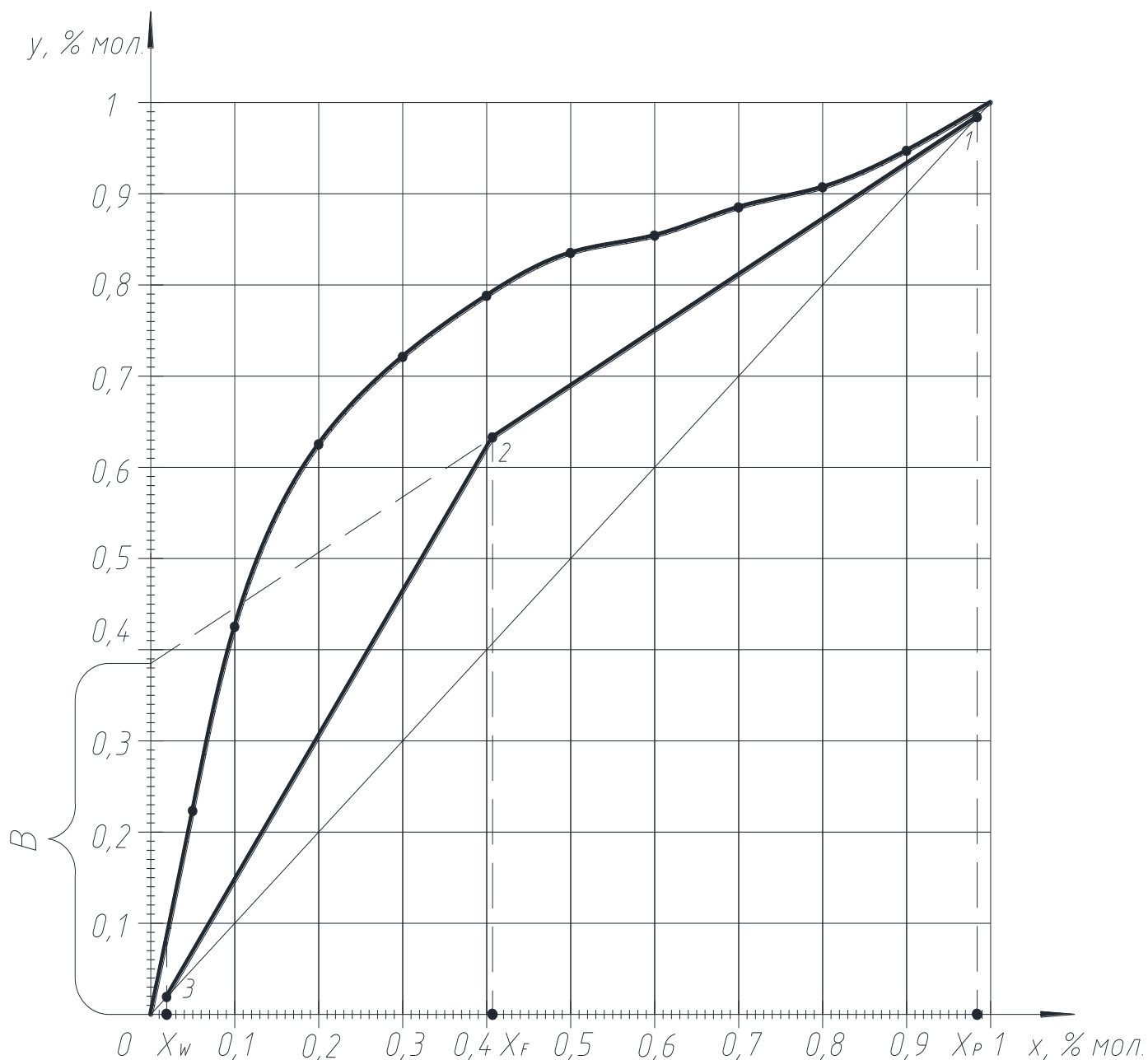


Рисунок 4.3 – Побудова робочих ліній.

### 4.3 Визначення середніх значень параметрів колони, фізико-хімічних та термодинамічних констант фаз

Рідка фаза.

Середня мольна концентрація для нижньої частини колони:

$$X_{\text{сер.}}^{\text{н}} = \frac{X_W + X_F}{2}. \quad (4.7)$$

$$X_{\text{сеп.}}^{\text{H}} = \frac{0,019 + 0,407}{2} = 0,213.$$

Середня мольна концентрація для верхньої частини колони:

$$X_{\text{сеп.}}^{\text{B}} = \frac{X_F + X_P}{2}. \quad (4.8)$$

$$X_{\text{сеп.}}^{\text{B}} = \frac{0,407 + 0,984}{2} = 0,6955.$$

Середня мольна концентрація в колоні:

$$X_{\text{сеп.}} = \frac{X_{\text{сеп.}}^{\text{H}} + X_{\text{сеп.}}^{\text{B}}}{2}. \quad (4.9)$$

$$X_{\text{сеп.}} = \frac{0,213 + 0,6955}{2} = 0,454.$$

Середня масова концентрація в колоні:

$$a_{\text{сеп.}} = \frac{X_{\text{сеп.}} \cdot M_A}{X_{\text{сеп.}} \cdot M_A + (1 - X_{\text{сеп.}}) \cdot M_B}. \quad (4.10)$$

$$a_{\text{сеп.}} = \frac{0,454 \cdot 78}{0,454 \cdot 78 + (1 - 0,454) \cdot 74} = 0,467.$$

Середня температура у нижньої частини колони:

$$t_{X_{\text{сеп.}}}^{\text{H}} = \frac{t_{X_W} + t_{X_F}}{2}. \quad (4.11)$$

$$t_{X_{\text{сеп.}}}^{\text{H}} = \frac{114,9 + 88,05}{2} = 101,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середня температура у верхньої частини колони:

$$t_{X_{\text{сеп.}}}^{\text{B}} = \frac{t_{X_F} + t_{X_P}}{2}. \quad (4.12)$$

$$t_{X_{\text{сеп.}}}^{\text{B}} = \frac{88,05 + 80,2}{2} = 84,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середня температура у колоні:

$$t_{X_{\text{сеп.}}} = \frac{t_{X_{\text{сеп.}}}^{\text{H}} + t_{X_{\text{сеп.}}}^{\text{B}}}{2}. \quad (4.13)$$

$$t_{X_{\text{сеп.}}} = \frac{101,5 + 84,1}{2} = 92,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення  $t_{X_W}$ ,  $t_{X_F}$ ,  $t_{X_P}$  взяті з діаграми  $t - y$ ,  $x$  (рис. 4.2).

Середня мольна маса:



$$M_{X_{\text{сер}}} = M_A \cdot X_{\text{сер}} + M_B \cdot (1 - X_{\text{сер}}), \quad (4.14)$$

$$M_{X_{\text{сер}}} = 78 \cdot 0,454 + 74 \cdot (1 - 0,454) = 75,82 \text{ кг/кмоль.}$$

Середня густина рідини визначається за формулою:

$$\rho_{X_{\text{сер}}} = \frac{\rho_A \cdot \rho_B}{\rho_B \cdot a_{\text{сер.}} + \rho_A (1 - a_{\text{сер.}})}, \quad (4.15)$$

де  $\rho_A, \rho_B$  – густина компонентів А та В при температурі  $t_{X_{\text{сер}}}$ .

При температурі  $t_{X_{\text{сер}}} = 92,8 \text{ }^\circ\text{C}$  за табл. 2 Додаток А [17]:  $\rho_A = 800,9$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_B = 756,4$  кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_{X_{\text{сер}}} = \frac{800,9 \cdot 756,4}{756,4 \cdot 0,467 + 800,9 \cdot (1 - 0,467)} = 776,55 \text{ кг/м}^3.$$

Середню в'язкість розраховуємо за рівнянням:

$$\lg \mu_{X_{\text{сер}}} = X_{\text{сер}} \cdot \lg \mu_A + (1 - X_{\text{сер}}) \cdot \lg \mu_B, \quad (4.16)$$

де  $\mu_A$  и  $\mu_B$  – динамічні коефіцієнти в'язкості компонентів А та В, Па · с.

При температурі  $t_{X_{\text{сер}}} = 92,8 \text{ }^\circ\text{C}$  за табл. 3 Додаток А [17]:  $\mu_A = 0,281$  мПа · с,  $\mu_B = 0,619$  мПа · с.

$$\lg \mu_{X_{\text{сер}}} = 0,454 \cdot \lg 0,281 + (1 - 0,454) \cdot \lg 0,619 = -0,364,$$

$$\mu_{X_{\text{сер}}} = 0,43 \text{ мПа} \cdot \text{с} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Середню силу поверхневого натягу визначаємо за рівнянням:

$$\sigma_{X_{\text{сер}}} = \sigma_A \cdot X_{\text{сер}} + \sigma_B \cdot (1 - X_{\text{сер}}), \quad (4.17)$$

де  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$  – сили поверхневих натягів компонентів А та В, Н/м.

При температурі  $t_{X_{\text{сер}}} = 92,8 \text{ }^\circ\text{C}$  за табл. 4 Додаток А [17]:

$$\sigma_A = 19,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}, \sigma_B = 18,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

$$\sigma_{X_{\text{сер}}} = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,454 + 18,4 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,454) = 18,99 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

Коефіцієнти дифузії при середній температурі  $t_{X_{\text{сер}}}$  визначаємо за рівнянням:

$$D_{X(t)} = D_{X(20)} [1 + b \cdot (t - 20)], \quad (4.18)$$

де  $D_{X(20)}$  – коефіцієнт дифузії при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , м<sup>2</sup>/с;

$b = \frac{0,2\sqrt{\mu}}{\sqrt[3]{\rho}}$ , тут  $\mu = 2,95$  [мПа с] и  $\rho = 810$  [кг/м<sup>3</sup>] – в'язкість та густина розчинника (бутиловий спирт) при  $t = 20$  °С;

$$t = t_{X_{\text{сер}}}.$$

Коефіцієнт дифузії при 20 °С розраховуємо за емпіричним рівнянням:

$$D_{X(20)} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{A \cdot B \cdot \sqrt{\mu}(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \quad (4.19)$$

де  $V_A$  и  $V_B$  – мольні об'єми компонентів А и В, см<sup>3</sup>/моль;

А, В – коефіцієнти, які залежать від властивостей компонентів, А = 1, В = 1 [17].

$$b = \frac{0,2\sqrt{\mu}}{\sqrt[3]{\rho}} = \frac{0,2\sqrt{2,95}}{\sqrt[3]{810}} = 0,037.$$

Мольні об'єми компонентів [17]:

$$V_A = 14,8 \cdot 6 + 3,7 \cdot 6 + 15 = 126 \text{ см}^3/\text{моль};$$

$$V_B = 14,8 \cdot 4 + 3,7 \cdot 9 + 7,4 + 3,7 = 103,6 \text{ см}^3/\text{моль}.$$

$$D_{X(20)} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{2,95}(126^{1/3} + 103,6^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{74}} = 1,01 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$D_{X(t)} = 1,01 \cdot 10^{-9}[1 + 0,037 \cdot (92,8 - 20)] = 3,73 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Парова фаза.

Середня мольна концентрація у нижній частині колони:

$$y_{\text{сер.}}^H = \frac{y_W + y_F}{2}. \quad (4.20)$$

$$y_{\text{сер.}}^H = \frac{0,019 + 0,633}{2} = 0,326.$$

Середня мольна концентрація у верхній частині колони:

$$y_{\text{сер.}}^B = \frac{y_F + y_P}{2}. \quad (4.21)$$

$$y_{\text{сер.}}^B = \frac{0,633 + 0,984}{2} = 0,8085.$$

Середня мольна концентрація у колоні:

$$y_{\text{сер.}} = \frac{y_{\text{сер.}}^{\text{H}} + y_{\text{сер.}}^{\text{B}}}{2} \quad (4.22)$$

$$y_{\text{сер.}} = \frac{0,326 + 0,8085}{2} = 0,567.$$

Середня температура у нижній частині колоні:

$$t_{y_{\text{сер.}}}^{\text{H}} = \frac{t_{y_{\text{W}}} + t_{y_{\text{F}}}}{2} \quad (4.23)$$

$$t_{y_{\text{сер.}}}^{\text{H}} = \frac{117,1 + 97,3}{2} = 107,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура у верхній частині колоні:

$$t_{y_{\text{сер.}}}^{\text{B}} = \frac{t_{y_{\text{F}}} + t_{y_{\text{P}}}}{2} \quad (4.24)$$

$$t_{y_{\text{сер.}}}^{\text{B}} = \frac{97,3 + 80,3}{2} = 88,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура у колоні:

$$t_{y_{\text{сер.}}} = \frac{t_{y_{\text{сер.}}}^{\text{H}} + t_{y_{\text{сер.}}}^{\text{B}}}{2} \quad (4.25)$$

Температури  $t_{y_{\text{W}}}$ ,  $t_{y_{\text{F}}}$ ,  $t_{y_{\text{P}}}$  вишукані з діаграми  $t - y$ ,  $x$  (рис. 4.2).

$$t_{y_{\text{сер.}}} = \frac{107,2 + 88,8}{2} = 98,0 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня мольна маса:

$$M_{y_{\text{сер.}}} = M_{\text{A}} \cdot y_{\text{сер.}} + M_{\text{B}} \cdot (1 - y_{\text{сер.}}), \quad (4.26)$$

$$M_{y_{\text{сер.}}} = 78 \cdot 0,567 + 74 \cdot (1 - 0,567) = 76,27 \text{ кг/кмоль}.$$

Середня густина:

$$\rho_{y_{\text{сер.}}} = \frac{M_{y_{\text{сер.}}}}{22,4} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \quad (4.27)$$

тут  $T = 273 + t_{y_{\text{сер.}}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 1 \text{ кгс/см}^2$  (тиск в колоні атмосферний).

$$\rho_{y_{\text{сер.}}} = \frac{76,27}{22,4} \cdot \frac{1}{1,033} \cdot \frac{273}{(273 + 98)} = 2,43 \text{ кг/м}^3.$$

Середня в'язкість:

$$\frac{M_{y_{\text{сер}}}}{\mu_{y_{\text{сер}}}} = \frac{y_{\text{сер}} \cdot M_A}{\mu_{y_A}} + \frac{(1 - y_{\text{сер}}) \cdot M_B}{\mu_{y_B}}, \quad (4.28)$$

де  $\mu_{y_A}$  и  $\mu_{y_B}$  – динамічні коефіцієнти в'язкості пари компонентів А та В.

При температурі  $t_{y_{\text{сер}}} = 98 \text{ } ^\circ\text{C}$  (Номограма 1 Додаток А [17]):

$$\mu_{y_A} = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad \mu_{y_B} = 0,97 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

$$\frac{76,27}{\mu_{y_{\text{сер}}}} = \frac{0,567 \cdot 78}{1,28 \cdot 10^{-5}} + \frac{(1 - 0,567) \cdot 74}{0,97 \cdot 10^{-5}},$$

$$\mu_{y_{\text{сер}}} = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Коефіцієнт дифузії для паровій фазі визначають за рівнянням:

$$D_y = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} \cdot T^{3/2}}{P \cdot (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \quad (4.28)$$

де  $T = 273 + t_{y_{\text{сер}}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ;

$P = 1 \text{ кгс/см}^2$  (тиск у колоні атмосферний).

$$D_y = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} \cdot (273 + 98)^{3/2}}{1 \cdot (126^{1/3} + 103,6^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{74}} = 0,53 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

#### 4.4 Визначення діаметру колони

Діаметр колони визначають за рівнянням:

$$D = \sqrt{\frac{V_y}{0,785 \cdot W}}, \quad (4.29)$$

де  $V_y$  – витрата пари, що проходить по колоні,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$W$  – швидкість пари, яка віднесена до повного поперечного перерізу колони,  $\text{м/с}$ .

Витрата пари, яка підіймається колоною, може бути розрахована як:

$$V_y = \frac{G_y}{\rho_{y_{\text{сер}}}} = \frac{G_p \cdot (R + 1)}{\rho_{y_{\text{сер}}}}. \quad (4.30)$$

$$V_y = \frac{3088,08 \cdot (1,558 + 1)}{3600 \cdot 2,43} = 0,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Швидкість пари в колоні, що рекомендується в літературі [1], розраховують з формули:

$$W = C \sqrt{\frac{\rho_{x_{\text{сеп}}} - \rho_{y_{\text{сеп}}}}{\rho_{y_{\text{сеп}}}}}, \quad (4.31)$$

де  $C$  – коефіцієнт, який залежить від конструкції тарілки, відстані між тарілками та робочого тиску в колоні. Попередньо приймаємо відстань між тарілками  $h = 300$  мм. Для сітчастих тарілок з графіка  $C = 0,032$ .

$$W = 0,032 \cdot \sqrt{\frac{776,55 - 2,43}{2,43}} = 0,57 \text{ м/с}.$$

Тоді діаметр колоні:

$$D = \sqrt{\frac{V_y}{0,785 \cdot W}}. \quad (4.32)$$

$$D = \sqrt{\frac{0,9}{0,785 \cdot 0,57}} = 1,42 \text{ м}.$$

Приймаємо стандартне значення діаметра колоні  $D = 1,6$  м та уточнюємо швидкість пари у колоні:

$$W = \frac{V_y}{0,785 \cdot D^2} = \frac{0,9}{0,785 \cdot 1,6^2} = 0,45 \text{ м/с}.$$

#### 4.5 Визначення висоти колоні

Знаходимо коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі за рівнянням:

$$\beta_{xf} = \frac{38000 \cdot \rho_{x_{\text{сеп}}} \cdot D_{X(t)}}{M_{X_{\text{сеп}}} \cdot h} \cdot (Pr')^{0,62}, \quad (4.33)$$

де  $h$  – лінійний розмір,  $h = 1$  м;

$Pr'$  - дифузний критерій Прандтля.

$$Pr' = \frac{\mu_{x_{\text{сеп}}}}{D_{X(t)} \cdot \rho_{x_{\text{сеп}}}}. \quad (4.34)$$

$$Pr' = \frac{0,43 \cdot 10^{-3}}{3,73 \cdot 10^{-9} \cdot 776,55} = 148,45.$$

$$\beta_{xf} = \frac{38000 \cdot 776,55 \cdot 3,73 \cdot 10^{-9}}{75,82 \cdot 1} \cdot (148,45)^{0,62} =$$

$$= 0,032 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{М}^2 \cdot \text{С} \cdot \text{КМОЛЬ/КМОЛЬ}}.$$

Коефіцієнт масовіддачі в паровій фазі знаходимо за рівнянням:

$$\beta_{yf} = \frac{D_y}{22,4} \cdot (0,79 \cdot Re_y + 11000), \quad (4.35)$$

де  $Re_y$  – критерій Рейнольдса.

$$Re_y = \frac{W \cdot h \cdot \rho_{y_{\text{ср}}}}{\mu_{y_{\text{ср}}}}. \quad (4.36)$$

$$Re_y = \frac{0,45 \cdot 1 \cdot 2,43}{1,13 \cdot 10^{-5}} = 96770.$$

$$\beta_{yf} = \frac{0,53 \cdot 10^{-5}}{22,4} \cdot (0,79 \cdot 96770 + 11000) = 0,0207 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{М}^2 \cdot \text{С} \cdot \text{КМОЛЬ/КМОЛЬ}}.$$

Загальний коефіцієнт масопередачі  $K_{yf}$  знаходимо із рівняння:

$$\frac{1}{K_{yf}} = \frac{1}{\beta_{yf}} + \frac{m}{\beta_{xf}}, \quad (4.37)$$

де  $m$  – тангенс кута нахилу лінії рівноваги до осі абсцис  $Ox$ .

$$m = \frac{y^* - y}{x - x^*}, \quad (4.38)$$

де  $y^*$ ,  $x^*$  – рівноважні концентрації.

Так як величина  $m$  є змінна за висотою колони внаслідок різних концентрацій рідини та пари, то знаходимо її значення за допомогою діаграми рівноваги (рис. 4.4).

В межах від  $x_w$  до  $x_p$  вибираємо ряд значень  $x$ , для кожного значення  $x$  визначаємо за діаграмою  $y - x$  (рис. 4.4) величини  $(y^* - y)$  та  $(x - x^*)$ , як різницю між рівноважною та робочою концентраціями для парової фази та як різницю

між робочою та рівноважної концентраціями для рідкої фази. Далі за цими результатами розраховуємо коефіцієнт  $m$ . Результати зводимо у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Визначення поверхового коефіцієнта масопередачі

$x$	$y^* - y$	$x - x^*$	$m$	$K_{yf} \cdot 10^3$
0,019	0,065	0,015	4,33	5,9
0,05	0,155	0,0345	4,49	5,7
0,1	0,278	0,067	4,15	6,1
0,2	0,320	0,132	2,42	9,1
0,3	0,2575	0,187	1,38	12,85
0,4	0,166	0,203	0,82	16,6
0,5	0,146	0,2385	0,61	18,6
0,6	0,104	0,2595	0,40	21,2
0,7	0,074	0,259	0,29	22,8
0,8	0,035	0,141	0,25	23,5
0,9	0,014	0,030	0,47	20,2
0,984	0,007	0,013	0,54	19,4

Для побудування кінетичної кривої на діаграмі  $y - x$  (рис. 4.4) скористуємося формулою:

$$y^* - y_k = (y^* - y_n) \cdot e^{-\frac{K_{yf} \cdot F_p}{G_y}} \quad (4.39)$$

Різниця  $(y^* - y_n)$  це значення  $CA = (y^* - y)$  для кожного вибраного  $x$  в межах від  $x_w$  до  $x_p$ .

Робоча площа тарілки може бути знайдена з табл. 1 Додатку В [17]:  
 $F_p = 1,834 \text{ м}^2$ .

Мольна витрата пари у колоні:

$$G_y = \frac{G_p \cdot (R + 1)}{M_{y_{cp}}} \quad (4.40)$$

$$G_y = \frac{3088,08 \cdot (1,558 + 1)}{3600 \cdot 76,27} = 0,0288 \text{ кмоль/с.}$$

Результати зводимо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - До побудування кінетичної кривої

x	$\frac{K_{yf} \cdot F_p}{G_y}$	$\overline{AC}$ , мм	$\overline{BC} = \frac{\overline{AC}}{e^{\frac{K_{yf} \cdot F_p}{G_y}}}$
0,019	0,376	6,5	4,5
0,05	0,363	15,5	10,8
0,1	0,3885	27,8	18,85
0,2	0,5795	32,0	17,9
0,3	0,818	25,75	11,4
0,4	1,057	16,6	5,8
0,5	1,1845	14,6	4,5
0,6	1,350	10,4	2,7
0,7	1,452	7,4	1,7
0,8	1,4965	3,5	0,8
0,9	1,286	1,4	0,4
0,984	1,235	0,7	0,2

За даними таблиці 4.3 будуємо кінетичну криву на діаграмі  $y - x$  (рис. 4.4). Точки  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{12}$  лежать на робочих лініях, точки  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{12}$  – на рівноважній кривій. Розраховані відрізки  $B_1C_1, B_2C_2, B_3C_3, \dots, B_{12}C_{12}$  відкладаємо від відповідних точок  $C$  вниз. Кінетична крива починається з начала координат, проходить через точки  $B_1, B_2, B_3, \dots, B_{12}$  и закінчується в правому верхньому куту діаграми  $y - x$ .

Число дійсних тарілок, які забезпечують задану чіткість розділення, визначаємо шляхом побудування "ступенів" між робочими лініями и кінетичною кривою. Число ступенів в межах концентрацій  $x_w$   $x_p$  рівно числу дійсних тарілок.

У результаті побудування (рис. 4.4) отримуємо число дійсних тарілок  $n = 21$ , тарілка живлення 7-а знизу.



Висоту колони визначаємо за рівнянням:

$$H = (n - 1) \cdot h + H_{\text{сеп}} + H_{\text{куб}}, \quad (4.41)$$

де  $n$  – число дійсних тарілок в колоні;

$h$  – відстань між тарілками, м;

$H_{\text{сеп}}$  – висота сепараційної частини колони, м;

$H_{\text{куб}}$  – висота кубової частини колони, м.

Висоти  $H_{\text{сеп}}$  и  $H_{\text{куб}}$  для нормалізованих колон різних діаметрів приймаємо за таблицею:  $H_{\text{сеп}} = 0,8$  м;  $H_{\text{куб}} = 2$  м.

$$H = (21 - 1) \cdot 0,3 + 0,8 + 2 = 8,8 \text{ м.}$$

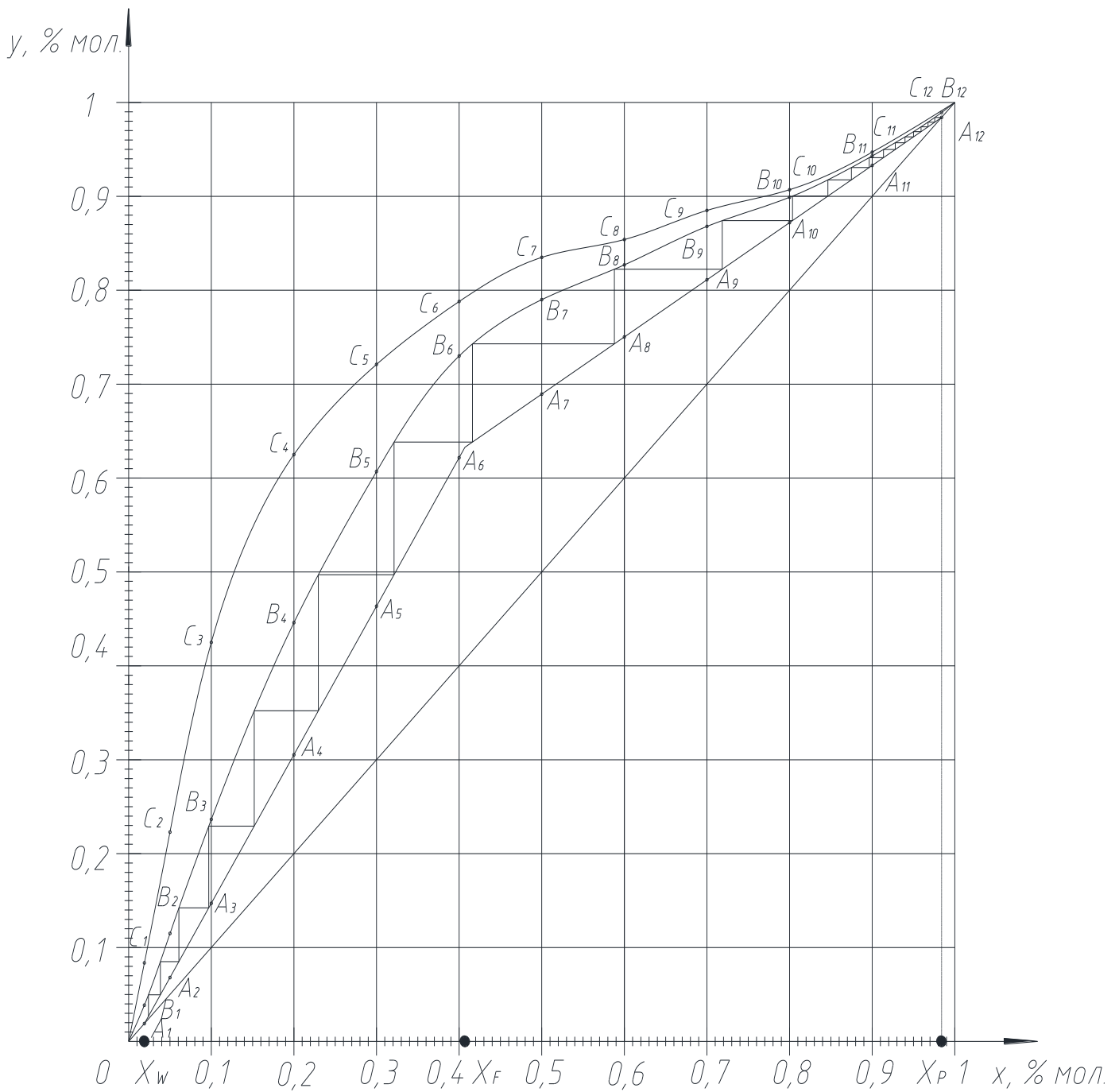


Рис. 4.4 – Побудова кінетичної кривої та визначення числа дійсних тарілок

#### 4.6 Визначення гідравлічного опору колони з сітчастими тарілками

Гідравлічний опір ректифікаційної колони визначаємо за рівнянням:

$$\Delta P_K = n \cdot \Delta P_T, \quad (4.42)$$

де  $\Delta P_T$  – гідравлічний опір тарілки, Па.

Незалежно від типу тарілки, загальний гідравлічний опір тарілки  $\Delta P_T$  можна розглядати як суму трьох складових:

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (4.43)$$

де  $\Delta P_{\text{сух}}$  – опір сухої тарілки, Па;

$\Delta P_{\sigma}$  – опір, що викликається силами поверхневого натягу, Па;

$\Delta P_{\text{ст}}$  – статичний опір шару рідини на тарілці, Па.

Для сітчастої тарілки приймаємо: діаметр отворів  $d_o = 3$  мм, висота переливу  $h_{\text{пер}} = 30$  мм, вільний переріз тарілки  $F_o = 0,08$  (8%).

Гідравлічний опір сухої сітчастої тарілки визначаємо за рівнянням:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \varepsilon \frac{W_0^2 \cdot \rho_{y \text{ ср}}}{2}, \quad (4.44)$$

де  $\varepsilon$  – коефіцієнт опору, що залежить від вільного перетину отворів:

$\varepsilon = 1,82$  – для сітчатих тарілок, у яких вільний перетин отворів становить 7 - 10% від загальної площі перетину колони;

$\varepsilon = 1,45$  – для сітчатих тарілок, у яких вільний перетин отворів становить 15 - 20% від загальної площі перетину колони;

$W_0$  – швидкість пари в отворах тарілки, м/с.

Швидкість пари в отворах тарілки:

$$W_0 = \frac{W}{F_o} = \frac{0,45}{0,08} = 5,625 \text{ м/с.}$$

$$\Delta P_{\text{сух}} = 1,82 \frac{5,625^2 \cdot 2,43}{2} = 70,0 \text{ Па.}$$

Гідравлічний опір, який обумовлений силами поверхневого натягу рідини на тарілці:

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma_{\text{хсер}}}{1,3d_o + 0,08d_o^2}. \quad (4.45)$$

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4 \cdot 18,99 \cdot 10^{-3}}{1,3 \cdot 0,003 + 0,08 \cdot 0,003^2} = 19,5 \text{ Па.}$$

Статичний опір шару рідини на тарілці:

$$\Delta P_{\text{ст}} = 1,3 \left[ K \cdot h_{\text{пер}} + \sqrt[3]{K \left( \frac{L}{m \cdot l_{\text{зл}}} \right)^2} \right] \cdot \rho_{x \text{ сеп}} \cdot g, \quad (4.46)$$

де  $K$  – відношення щільності піни до щільності рідкої фази, приймаємо  $K=0,5$ ;

$h_{\text{пер}}$  – висота переливу, м;

$L$  – витрата рідкої фази, м<sup>3</sup>/год;

$l_{\text{зл}}$  – довжина зливного борту, м;

$m$  – коефіцієнт витрати через перелив.

Для визначення статичного тиску рідини на тарілці розраховуємо витрату рідкої фази у нижній частині колони:

$$L = G_p \cdot R + G_F = 3088,08 \cdot 1,558 + 7450 = 12261,23 \text{ кг/год}$$

або в об'ємному вираженні 15,79 м<sup>3</sup>/год.

Для колони  $D = 1,6$  м довжина зливного борту  $l_{\text{зл}} = l_2 = 0,795$  м (див. табл. 1 Додаток В [17]), тоді інтенсивність потоку

$$\frac{L}{l_{\text{зл}}} = \frac{15,79}{0,795} = 19,86 \frac{\text{м}^3}{\text{год} \cdot \text{м}}$$

Так як  $\frac{L}{l_{\text{зл}}} = 19,86 > 5 = \frac{\text{м}^3}{\text{год} \cdot \text{м}}$ , то  $m = 10000$ .

$$\Delta P_{\text{ст}} = 1,3 \left[ 0,5 \cdot 0,03 + \sqrt[3]{0,5 \left( \frac{15,79}{10000 \cdot 0,795} \right)^2} \right] \cdot 776,55 \cdot 9,81 = 1136,6 \text{ Па.}$$

Гідрравлічний опір однією сітчастої тарілки складає:

$$\Delta P_{\text{т}} = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{ст}} = 70,0 + 19,5 + 1136,6 = 1226,1 \text{ Па.}$$

Гідрравлічний опір колони:

$$\Delta P_{\text{к}} = n \cdot \Delta P_{\text{т}} = 21 \cdot 1226,1 = 25748,1 \text{ Па.}$$

Раніше прийняті відстані між тарілками  $h = 0,3$  м перевіряємо за відношенням:

$$h > 1,8 \cdot \frac{\Delta P_{\text{т}}}{\rho_{x \text{ сеп}} \cdot g},$$

$$1,8 \cdot \frac{1226,1}{776,55 \cdot 9,81} = 0,29 \text{ м,}$$

$0,3 > 0,29$  – умова дотримується.

## 4.7 Тепловий розрахунок

### 4.7.1 Підігрівник вихідної суміші

Рівняння теплового балансу для підігрівника вихідної суміші:

$$Q = 1,05 \cdot G_F \cdot C'_F \cdot (t_{X_F} - t_{\Pi}) = G_{г.п} \cdot r, \quad (4.47)$$

тут теплові втрати прийняті в розмірі 5% від корисної теплоти, що затрачується;

$C'_F$  – питома теплоємність вихідної суміші, Дж/кг·К;

$t_{X_F}$  – температура кипіння вихідної суміші, °С;

$t_{\Pi}$  – початкова температура (задана), °С;

$G_{г.п}$  – витрата пари, що гріє, кг/с;

$r$  – питома теплота пароутворення при заданому значенні тиску пари, що гріє, Дж/кг.

Питома теплоємність вихідної суміші:

$$C'_F = a_F \cdot C_A + (1 - a_F) \cdot C_B, \quad (4.48)$$

де  $C_A$ ,  $C_B$  – питомі теплоємності бензолу і бутилового спирту при середній температурі

$$t_{X_F}^{\text{сеп}} = \frac{t_{X_F} + t_{\Pi}}{2} = \frac{88,05 + 30,0}{2} = 59,0 \text{ °С;}$$

$$C_A = 0,459 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}; C_B = 0,657 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}.$$

$$C'_F = 0,42 \cdot 0,459 + (1 - 0,42) \cdot 0,657 = 0,574 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} = 2405 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q = 1,05 \cdot G_F \cdot C'_F \cdot (t_{X_F} - t_{\Pi}) = 1,05 \cdot \frac{7450}{3600} \cdot 2405 \cdot (88,05 - 30,0) \\ = 303518,2 \text{ Вт.}$$

Витрати пари, що гріє:

$$G_{г.п} = \frac{Q}{r} = \frac{303518,2}{2104,3 \cdot 10^3} = 0,144 \text{ кг/с,}$$

$r = 2104,3 \text{ кДж/кг}$  при  $P = 5,578 \text{ кгс/см}^2$  ( $P = 5,4 \text{ атм.}$ ).

Температура насиченої водяної пари при  $P = 5,578 \text{ кгс/см}^2$  ( $P = 5,4 \text{ атм.}$ ) складає  $155,15 \text{ }^\circ\text{C}$  (таблиця 10 Додатку А [17]).

Середня різниця температур:

$$155,15 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 155,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$30,0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 88,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_{\text{б}} = 155,15 - 30,0 = 125,15 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_{\text{м}} = 155,15 - 88,05 = 67,1 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Так як

$$\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{125,15}{67,1} = 1,87 < 2,$$

тоді середню різницю температур визначаємо за рівнянням:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}. \quad (4.49)$$

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{125,15 + 67,1}{2} = 96,125 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Коефіцієнт теплопередачі приймаємо орієнтовно рівним  $K = 250 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  [6, с. 47].

Поверхня теплообміну підігрівника вихідної суміші:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{сер}}}. \quad (4.50)$$

$$F = \frac{303518,2}{250 \cdot 96,125} = 12,63 \text{ м}^2.$$

Вибираємо одноходовий кожухотрубчастий теплообмінник із наступними характеристиками [7, с. 51]:

- діаметр кожуха 325 мм;
- труба  $\text{Ø } 25 \times 2$  мм;

- кількість труб в теплообміннику 62 шт.;
- довжина труб 3 м;
- поверхня теплообміну 14,5 м<sup>2</sup>.

#### 4.7.2 Дефлегматор (конденсатор)

Витрата теплоти, що віддається охолоджуючій воді при конденсації пари в дефлегматорі, визначають із рівняння теплового балансу дефлегматора:

$$Q_D = G_p \cdot (R + 1) \cdot r_p = G_B \cdot C_B \cdot (t_k - t_{\Pi}), \quad (4.51)$$

$$\text{тут } r_p = a_p \cdot r_A + (1 - a_p) \cdot r_B.$$

Питомі теплоти пароутворення бензола  $r_A$  та бутилового спирта  $r_B$  при  $t_{\text{хр}} = 80,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (таблиця 9 Додатку А [17]):

$$r_A = 393,85 \text{ кДж/кг}; r_B = 632,65 \text{ кДж/кг}.$$

$$r_p = 0,985 \cdot 393,85 + (1 - 0,985) \cdot 632,65 = 397,432 \text{ кДж/кг}.$$

$$Q_D = \frac{3088,08}{3600} \cdot (1,558 + 1) \cdot 397,432 \cdot 10^3 = 872066,1 \text{ Вт}.$$

Приймаємо температуру охолоджуючої води на виході з дефлегматора  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , тоді витрата охолоджуючої води

$$G_B = \frac{Q_D}{C_B \cdot (t_k - t_{\Pi})} = \frac{872066,1}{4190 \cdot (25 - 10)} = 13,88 \text{ кг/с}.$$

Середня різниця температур при протитечійній схемі руху теплоносіїв:

$$80,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad 80,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$25,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \leftarrow \quad 10,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_{\text{б}} = 80,2 - 10,0 = 70,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_{\text{м}} = 80,2 - 25,0 = 55,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Так як

$$\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{70,2}{55,2} = 1,27 < 2,$$

тоді середню різницю температур визначаємо за рівнянням:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} = \frac{70,2 + 55,2}{2} = 62,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Приймаємо орієнтовно коефіцієнт теплопередачі  $K=500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [6, с. 47].

Поверхня теплообміну дефлегматора:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{872066,1}{500 \cdot 62,7} = 27,82 \text{ м}^2.$$

Вибираємо двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник із наступними характеристиками [7, с. 51]:

- діаметр кожуха 400 мм;
- труба  $\text{Ø} 20 \times 2$  мм;
- кількість труб в теплообміннику 166 шт.;
- довжина труб 3 м;
- поверхня теплообміну 31,0 м<sup>2</sup>.

### 4.7.3 Холодильник дистилляту

Витрата теплоти, що віддається охолоджуючій воді у водяному холодильнику дистилляту, визначають із рівняння теплового балансу:

$$Q = G_p \cdot C'_p \cdot (t_{Xp} - t_{p \text{кін}}) = G_B \cdot C_B \cdot (t_k - t_n), \quad (4.52)$$

де  $C'_p$  – середня питома теплоємність дистилляту при його середній температурі:

$$t_{Xp}^{\text{сер}} = \frac{t_{Xp} + t_{p \text{кін}}}{2} = \frac{80,2 + 26,0}{2} = 53,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$t_{p \text{кін}}$  – кінцева температура дистилляту після холодильника,  $t_{p \text{кон}} = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$  (за завданням).

$$C'_p = a_p \cdot C_A + (1 - a_p) \cdot C_B,$$

$$C_A = 0,452 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; C_B = 0,642 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \text{ (таблиця 8 Додатку А [17])}.$$

$$C'_p = 0,985 \cdot 0,452 + (1 - 0,985) \cdot 0,642 = 0,455 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} = 1906,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$



$$Q = G_p \cdot C_p' \cdot (t_{Xp} - t_{p \text{ кін}}) = \frac{3088,08}{3600} \cdot 1906,5 \cdot (80,2 - 26,0) = 88638,45 \text{ Вт.}$$

Витрата охолоджувальної води при нагріві її до температури 15°C в холодильнику товарного дистиляту:

$$G_B = \frac{Q}{C_B \cdot (t_k - t_{п})} = \frac{88638,45}{4190 \cdot (25 - 10)} = 1,41 \text{ кг/с.}$$

Середня різниця температур при протитечійній схемі руху теплоносіїв:

$$80,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad 26,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$25,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \leftarrow \quad 10,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_{\delta} = 80,2 - 25,0 = 55,2 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_{\text{м}} = 26,0 - 10,0 = 16,0 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Так як

$$\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{55,2}{16,0} = 3,45 > 2,$$

тоді середню різницю температур визначаємо за рівнянням:

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)}. \quad (4.53)$$

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{55,2 - 16,0}{\ln\left(\frac{55,2}{16,0}\right)} = 31,65 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

При орієнтовному значенні  $K = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [6, с. 47], поверхня теплообміну холодильника товарного дистиляту складе:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{сеп}}} = \frac{88638,45}{400 \cdot 31,65} = 7,0 \text{ м}^2.$$

Вибираємо одноходовий кожухотрубчастий теплообмінник із наступними характеристиками [7, с. 51]:

- діаметр кожуха 325 мм;
- труба  $\text{Ø} 25 \times 2$  мм;

- кількість труб в теплообміннику 62 шт.;
- довжина труб 1,5 м;
- поверхня теплообміну 7,5 м<sup>2</sup>.

#### 4.7.4 Холодильник кубового залишку

Витрата теплоти, що віддається охолоджуючій воді у водяному холодильнику кубового залишку, визначається із рівняння теплового балансу:

$$Q = G_W \cdot C'_W \cdot (t_{X_W} - t_{W \text{ кін}}) = G_B \cdot C_B \cdot (t_k - t_n), \quad (4.54)$$

де  $C'_W$  – середня питома теплоємність кубового залишку при його середній температурі:

$$t_{X_W}^{\text{сеп}} = \frac{t_{X_W} + t_{W \text{ кін}}}{2} = \frac{114,9 + 26,0}{2} = 70,45 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$t_{W \text{ кін}}$  – кінцева температура кубового залишку після холодильника,  $t_{W \text{ кон}} = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$  (за завданням).

$$C'_W = a_W \cdot C_A + (1 - a_W) \cdot C_B,$$

$$C_A = 0,472 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; C_B = 0,687 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \text{ (таблиця 8 Додатку А [17])}.$$

$$C'_W = 0,02 \cdot 0,472 + (1 - 0,02) \cdot 0,687 = 0,683 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} = 2861,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$Q = G_W \cdot C'_W \cdot (t_{X_W} - t_{W \text{ кін}}) = \frac{4361,92}{3600} \cdot 2861,8 \cdot (114,9 - 26,0) \\ = 308259,3 \text{ Вт}.$$

Витрата охолоджувальної води при нагріві її до температури 15<sup>o</sup>C в холодильнику кубового залишку:

$$G_B = \frac{Q}{C_B \cdot (t_k - t_n)} = \frac{308259,3}{4190 \cdot (25 - 10)} = 4,9 \text{ кг/с}.$$

Середня різниця температур при протитечійній схемі руху теплоносіїв:

$$114,9 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$25,0 \text{ } ^\circ\text{C} \leftarrow 10,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_{\delta} = 114,9 - 25,0 = 89,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_{\text{м}} = 26,0 - 10,0 = 16,0 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Так як

$$\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{89,9}{16,0} = 5,62 > 2,$$

тоді середню різницю температур визначаємо за рівнянням:

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{89,9 - 16,0}{\ln\left(\frac{89,9}{16,0}\right)} = 42,81 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При орієнтовному значенні  $K = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [6, с. 47], поверхня теплообміну холодильника кубового залишку складе:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{сеп}}} = \frac{308259,3}{400 \cdot 42,81} = 18,0 \text{ м}^2.$$

Вибираємо двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник з плаваючою головкою із наступними характеристиками [7, с. 52]:

- діаметр кожуха 400 мм;
- труба  $\text{Ø } 25 \times 2$  мм;
- довжина труб 3 м;
- поверхня теплообміну  $19,0 \text{ м}^2$ .

#### 4.7.5 Кип'ятильник

В хімічній та нафтохімічній промисловості широко застосовують вертикальні термосифонні рибойлери для підводу тепла до нижньої частини ректифікаційних колон. Це пояснюється тим, що термосифонні рибойлери є найбільш економічним типом для більшості технологічних процесів.

Кількість теплоти  $Q_{\text{к}}$ , яке необхідно подавати в куб колони, визначається із рівняння теплового балансу колони:

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{д}} + G_{\text{р}} \cdot C_{\text{р}} \cdot t_{\text{хр}} + G_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{хв}} - G_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} \cdot t_{\text{хф}} + Q_{\text{вт}}. \quad (4.55)$$

Теплові втрати приймають 3% від теплоти, що корисно витрачається.

Питомі теплоємності узяті відповідно при температурах  $t_{Xp} = 80,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  
 $t_{XF} = 88,05 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $t_{XW} = 114,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$$C_p = a_p \cdot C_A + (1 - a_p) \cdot C_B = 0,985 \cdot 0,483 + (1 - 0,985) \cdot 0,712 =$$

$$= 0,486 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} = 2036,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_F = a_F \cdot C_A + (1 - a_F) \cdot C_B = 0,42 \cdot 0,492 + (1 - 0,42) \cdot 0,733 =$$

$$= 0,632 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} = 2648,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_W = a_W \cdot C_A + (1 - a_W) \cdot C_B = 0,02 \cdot 0,516 + (1 - 0,02) \cdot 0,804 =$$

$$= 0,798 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} = 3343,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q_k = 1,03 \cdot (872066,1 + \frac{3088,08}{3600} \cdot 2036,3 \cdot 80,2 + \frac{4361,92}{3600} \cdot 3343,6 \cdot 114,9 -$$

$$- \frac{7450}{3600} \cdot 2648,1 \cdot 88,05) = 1024974,8 \text{ Вт.}$$

Витрати пари, що гріє:

$$G_{г.п} = \frac{Q}{r} = \frac{810074,3}{2104,3 \cdot 10^3} = 0,385 \text{ кг/с,}$$

$r = 2104,3 \text{ кДж/кг}$  при  $P = 5,578 \text{ кгс/см}^2$  ( $P = 5,4 \text{ атм.}$ ).

Середня різниця температур рівна різниці між температурою насиченої пари при  $P = 5,578 \text{ кгс/см}^2$  ( $P = 5,4 \text{ атм.}$ ) і температурою кипіння кубового залишку:

$$\Delta t_{\text{сер}} = 155,15 - 114,9 = 40,25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При орієнтовно прийнятому значенні коефіцієнта теплопередачі  $K = 2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  [6, с. 47], поверхня кип'ятильника складе:

$$F = \frac{Q_k}{K \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{1024974,8}{2000 \cdot 40,25} = 12,7 \text{ м}^2.$$

Вибираємо одноходовий кожухотрубчастий теплообмінник із наступними характеристиками [7, с. 51]:

- діаметр кожуха 325 мм;
- труба  $\text{Ø} 25 \times 2$  мм;

- кількість труб в теплообміннику 62 шт.;
- довжина труб 3 м;
- поверхня теплообміну 14,5 м<sup>2</sup>.

#### 4.8 Визначення діаметра штуцерів

Діаметр штуцера розраховуємо за рівнянням сталості витрат:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot W'}} \quad (4.56)$$

де  $V$  – об'ємна продуктивність, м<sup>3</sup>/с;

$W$  – швидкість руху потоку, м/с.

Штуцер подачі флегми:

$$d = \sqrt{\frac{V_{\phi}}{0,785 \cdot W_{\phi}'}}$$

$$V_{\phi} = \frac{G_{\phi}}{\rho_A} = \frac{G_p \cdot R}{\rho_A} = \frac{3088,08 \cdot 1,558}{3600 \cdot 815} = 1,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так як швидкості потоку приймаємо орієнтовно, то можна прийняти густину флегми, як густину бензолу: при температурі  $t_{xp} = 80,2$  °С  $\rho_A = 815$  кг/м<sup>3</sup>.

Приймаємо  $W_{\phi} = 0,5$  м/с, тоді

$$d = \sqrt{\frac{1,64 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,5}} = 0,065 \text{ м}.$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера Ø 73x3 мм [7, с. 17].

Штуцер подачі вихідної суміші до колони:

$$d = \sqrt{\frac{V_F}{0,785 \cdot W_F'}}$$

$$V_F = \frac{G_F}{\rho_F};$$

$$\rho_F = \frac{\rho_A \cdot \rho_B}{\rho_B \cdot a_F + \rho_A(1 - a_F)},$$

при  $t_{x_F} = 88,05 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\rho_F = \frac{806,15 \cdot 759,96}{759,96 \cdot 0,42 + 806,15(1 - 0,42)} = 778,70 \text{ кг/м}^3,$$

$$V_F = \frac{7450}{3600 \cdot 778,7} = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приймаємо  $W_F = 0,8 \text{ м/с}$ , тоді

$$d = \sqrt{\frac{2,66 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,8}} = 0,065 \text{ м}.$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø } 73 \times 3 \text{ мм}$  [7, с. 17].

Штуцер підводу парорідинної суміші до колони, яка виходить з кип'ятильника:

Для розрахунку діаметру парорідинного трубопроводу рекомендують наближену формулу:

$$d \approx d_{\text{вн}} \cdot \sqrt{n_{\text{тр}}}, \quad (4.57)$$

де  $d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр труби трубочатки кип'ятильника, м;

$n_{\text{тр}}$  – загальне число труб трубочатки кип'ятильника, шт. (див. розділ 3.7.5.)

$$d = 0,021 \cdot \sqrt{62} = 0,165 \text{ м}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø } 194 \times 6 \text{ мм}$ , [7, с. 17].

Штуцер виходу кубового залишку з колони:

$$d = \sqrt{\frac{V_W}{0,785 \cdot W_W}};$$

$$V_W = \frac{G_W}{\rho_B} = \frac{4361,92}{3600 \cdot 739,08} = 1,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$\rho_B = 739,08 \text{ кг/м}^3$  – густина бутилового спирта при температурі  $t_{xW} = 114,9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Приймаємо  $W_W = 0,3 \text{ м/с}$ , тоді

$$d = \sqrt{\frac{1,64 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,3}} = 0,083 \text{ м.}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}95 \times 4 \text{ мм}$ , [7, с. 17].

Штуцер виходу кубової рідини з колони, що далі надходить до кип'ятильника:

$$d = \sqrt{\frac{V_{\text{к.р.}}}{0,785 \cdot W_{\text{к.р.}}}};$$

$$V_{\text{к.р.}} = \frac{G_F + G_\phi - G_W}{\rho_B} = \frac{7450 + 3088,08 \cdot 1,558 - 4361,92}{3600 \cdot 739,08} = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приймаємо  $W_{\text{к.р.}} = 0,3 \text{ м/с}$ , тоді

$$d = \sqrt{\frac{2,97 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,3}} = 0,112 \text{ м.}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}133 \times 4 \text{ мм}$ , [7, с. 17].

Штуцер виходу пари з колони:

$$d = \sqrt{\frac{V_y}{0,785 \cdot W_y}};$$

$V_y = 0,9 \text{ м}^3/\text{с}$  (див. розділ 3.4).

Приймаємо  $W_y = 15$  м/с, тоді

$$d = \sqrt{\frac{0,9}{0,785 \cdot 15}} = 0,276 \text{ м.}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø } 325 \times 10$  мм.

#### 4.9 Вибір товщини стінки корпусу колони

Вибираємо відповідно до рекомендацій [17] (табл. 2.2 Розділ 2.8) товщину стінки корпусу колонного апарата рівною 10 мм.

#### 4.10 Розрахунок та вибір ємностей установки

Приймаємо, що установка повинна безперервно робити протягом  $\tau = 6$  годин = 21600 с, а наповненість ємностей повинна складати 80% від їх повного об'єму ( $K=0,8$ ).

Ємність вихідної суміші:

$$V = \frac{G_F \cdot \tau}{K \cdot \rho_{x \text{ сеп}}^{20}}, \quad (4.58)$$

де  $G_F = 7450$  кг/год;

$\rho_A = 879$  кг/м<sup>3</sup> – густина бензолу при 20 °С;

$\rho_B = 810$  кг/м<sup>3</sup> – густина бутилового спирту при 20 °С;

$a_F = 0,42$ .

$$V = \frac{7450 \cdot 21600}{3600 \cdot 0,8 \cdot 837,6} = 66,7 \text{ м}^3.$$

$$\rho_{x \text{ сеп}}^{20} = \frac{\rho_A \cdot \rho_B}{a_F \cdot \rho_B + (1 - a_F) \cdot \rho_A}. \quad (4.59)$$

$$\rho_{x \text{ сеп}}^{20} = \frac{879 \cdot 810}{0,42 \cdot 810 + (1 - 0,42) \cdot 879} = 837,6 \text{ кг/м}^3.$$

Вибираємо ємність із каталогу [8] ГЭЭ-63-0,6-1-К-0,7.

Ємність дистилляту:



$$V = \frac{G_p \cdot \tau}{K \cdot \rho_A^{20}} = \frac{3088,08 \cdot 21600}{3600 \cdot 0,8 \cdot 879} = 26,3 \text{ м}^3,$$

де  $G_p = 3088,08$  кг/год.

Вибираємо ємність із каталогу [8] ГЭЭ-25-0,6-1-К-0,9.

Ємність кубового залишку:

$$V = \frac{G_w \cdot \tau}{K \cdot \rho_B^{20}} = \frac{4361,92 \cdot 21600}{3600 \cdot 0,8 \cdot 810} = 40,4 \text{ м}^3,$$

де  $G_w = 4361,92$  кг/с.

Вибираємо ємність із каталогу [8] ГЭЭ-40-0,6-1-К-0,7.

## 5 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ХОЛОДИЛЬНИКА

### 5.1 Вихідні дані

Тип апарата – холодильник	ХПГ, ТУ 26-02-1101-89
Внутрішній діаметр кожуха $D$ , мм	400
Довжина теплообмінних труб $l$ , мм	3000
Зовнішній діаметр теплообмінної труби $d_T$ , мм	25
Товщина стінки труби $S_T$ , мм	2
Число ходів по трубах	2
Розрахунковий тиск у трубному просторі $P_T$ , Мпа	0,6
Розрахунковий тиск у міжтрубному просторі $P_K$ , Мпа	0,6
Розрахункова температура труб $t_T$ , °С	115
Розрахункова температура кожуха $t_K$ , °С	26
Матеріал кожуха	Сталь 20
Матеріал розподільної камери, кришки, трубної решітки та теплообмінних труб	сталь марки 09Г2С
Середовище в трубному просторі – пожежовибухонебезпечне, 2 класу безпеки за ГОСТ 12.1.007–76	
Середовище в міжтрубному просторі – пожежовибухобезпечне, 4 класу безпеки за ГОСТ 12.1.007–76	
Загальне число циклів навантаження $N$	1000
Строк служби, років	10
Холодильник 426 ХПГ-1,0-М23/25-3-2 У ТУ26-02-1101-89	

### 5.2 Розрахунок на міцність теплообмінника

#### Розрахункова температура

Розрахункову температуру розподільної камери  $t_K$ , °С, визначаємо за формулою:

$$t_{\text{кам}} = 2t_{\text{T}} - t_{\text{K}}. \quad (5.1)$$

$$t_{\text{кам}} = 2 \cdot 115 - 26 = 204 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Розрахункову температуру ізольованих фланців визначаємо за формулою:

$$t_{\phi} = t, \quad (5.2)$$

де  $t$  - розрахункова температура апарата,  $^\circ\text{C}$ .

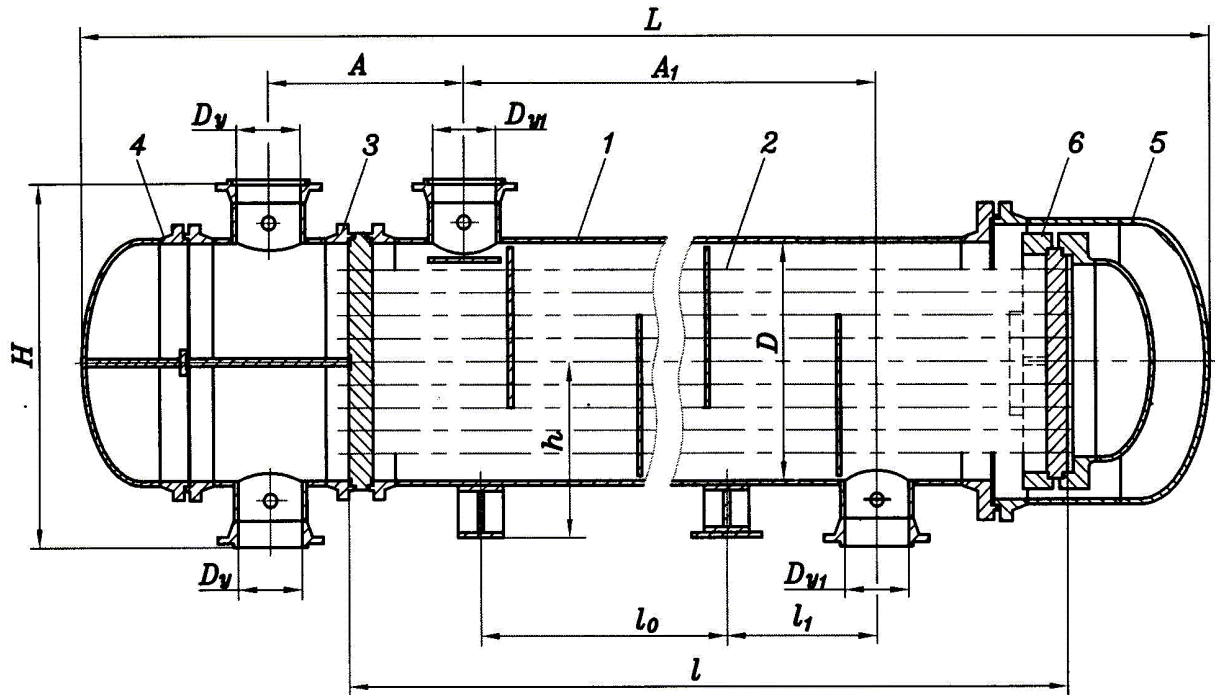


Рис. 5.1 - Кожухотрубчастий теплообмінник з плаваючою головою горизонтальний двоходовий по трубам

Розрахункову температуру ізольованих апаратних фланців та фланців штуцерів розподільної камери теплообмінника приймаємо рівною температурі розподільної камери, тобто

$$t_{\phi} = t_{\text{кам}} = 204 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Розрахункову температуру фланців штуцерів кожуха приймаємо рівною температурі середовища міжтрубного простору, тобто

$$t_{\phi} = t_{\text{T}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Розрахункову температуру болтів ізольованих фланцевих з'єднань визначаємо за формулою:

$$t_6 = 0,97t. \quad (5.3)$$

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

$$t_6 = 0,97t_{\text{кам}} = 0,97 \cdot 204 = 198 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Розрахункова температура болтів фланцевих з'єднань штуцерів міжтрубного простору

$$t_6 = 0,97t_{\text{к}} = 0,97 \cdot 26 = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

### Допустимі напружини

Допустимі напружини при розрахунковій температурі  $[\sigma]$  і при температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$   $[\sigma]_{20}$ , МПа, для матеріалів елементів апарата наведені в таблиці 5.1.

Пробний тиск, при якому проводиться випробування апарата, визначаємо за формулою

$$P_{\text{пр т}} = 1,25P_{\text{т}} \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}. \quad (5.4)$$

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  $[\sigma]_{20}/[\sigma] = 1,2$  пробний тиск складає

$$P_{\text{пр т}} = 1,25P_{\text{т}} [\sigma]_{20}/[\sigma] = 1,25 \cdot 0,6 \cdot 1,2 = 0,9 \text{ МПа}.$$

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору теплообмінника складає

$$P_{\text{г тр}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot H_{\text{с}} \cdot 10^{-6}, \quad (5.5)$$

де  $H_{\text{с}}$  - висота стовпа води у трубному просторі (відстань між фланцями штуцерів у розподільній камері).

$$P_{\text{г тр}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,714 \cdot 10^{-6} = 0,007 \text{ МПа}.$$

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору

$$P_{г\text{тр}} = 0,007 < 0,05P_{пр\text{т}} = 0,05 \cdot 0,9 = 0,045 \text{ МПа}$$

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

$$P_{i\text{т}} = P_{пр\text{т}} = 0,9 \text{ МПа.}$$

Таблиця 5.1 - Допустимі напружини матеріалів елементів теплообмінника

Елементи апарата	Матеріал	Допустимі напружини, МПа		Відношення допустимих напружин $[\sigma]_{20}/[\sigma]$
		при температурі 20 °С $[\sigma]_{20}$	при розрахунковій температурі $[\sigma]$	
Кожух	Сталь 20	147	146	1,01
Трубна решітка	Сталь марки 09Г2С	168	140	1,2
Труби	Сталь марки 09Г2С	168	140	1,2
Фланці апаратні	Сталь марки 09Г2С	168	140	1,2
Фланці штуцерів трубного простору	Сталь марки 09Г2С	168	140	1,2
Фланці штуцерів кожуха	Сталь 20	147	146	1,01
Болти та гайки апаратних фланців та штуцерів трубного простору	Сталь марки 09Г2С	168	140	1,2
Болти фланцевих з'єднань штуцерів кожуха	Сталь 35	130	120	1,083
Гайки фланцевих з'єднань штуцерів кожуха	Сталь 20	147	136	1,081

Умова

$$P_{i\text{т}} \leq 1,35P_{\text{т}} [\sigma]_{20}/[\sigma], \quad (5.6)$$

$$P_{i\text{т}} = 0,9 \text{ МПа} \leq 1,35P_{\text{т}} [\sigma]_{20}/[\sigma] = 1,35 \cdot 0,6 \cdot 1,2 = 0,97 \text{ МПа}$$

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

Для міжтрубного простору (кожуха) при відношенні допустимих напружин  $[\sigma]_{20}/[\sigma] = 1,01$  пробний тиск складає

$$P_{\text{пр к}} = 1,25P_{\text{к}} [\sigma]_{20}/[\sigma]. \quad (5.7)$$

$$P_{\text{пр к}} = 1,25 \cdot 0,6 \cdot 1,01 = 0,76 \text{ МПа.}$$

Гідростатичний тиск при випробуванні міжтрубного простору

$$P_{\text{Г к}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot H_{\text{к}} \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,714 \cdot 10^{-6} = 0,007 \text{ МПа,}$$

$$P_{\text{Г к}} = 0,007 < 0,05P_{\text{пр т}} = 0,05 \cdot 0,9 = 0,045 \text{ МПа}$$

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

$$P_{\text{і к}} = P_{\text{пр к}} = 0,76 \text{ МПа.}$$

Умова

$$P_{\text{і к}} = 0,76 \text{ МПа} \leq 1,35P_{\text{к}} [\sigma]_{20}/[\sigma] = 1,35 \cdot 0,6 \cdot 1,01 = 0,82 \text{ МПа}$$

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

### **Коефіцієнти міцності зварних швів**

Міжтрубний простір теплообмінника по розрахунковому тискові, температурі і характеру робочого середовища відноситься до 4 групи судин, для яких довжина контрольованих швів становить не менш 25 % від їхньої загальної довжини. Для стикових швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним зварюванням коефіцієнт міцності зварених швів ухвалюємо рівним  $\varphi_{\text{р}} = 0,9$  [19].

Трубний простір теплообмінника по розрахунковому тискові, температурі і характеру робочого середовища відноситься до 1 групи судин, для яких довжина контрольованих швів становить не менш 100 % від їхньої загальної довжини. Для стикових швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним зварюванням коефіцієнт міцності зварених швів ухвалюємо рівним  $\varphi_{\text{р}} = 1$  [19].

Для стикових (кільцевих) швів, які доступні зварюванню лише з однієї сторони і мають у процесі зварювання металеву підкладку з боку кореня шва, яка прилягає по всій довжині шва до основного металу, при контрольованій довжині швів 25 %, коефіцієнт міцності зварених кільцевих швів кожуха ухвалюємо рівним  $\varphi_{\tau} = 0,8$  [19].

#### **Добавки до розрахункових величин**

Суми добавок до розрахункових величин визначаємо по формулі:

$$C = C_1 + C_2, \quad (5.8)$$

де  $C_1$  - добавка для компенсації корозії і ерозії, мм;

$C_2$  - добавка для компенсації мінусового допуску, мм.

Добавку для компенсації корозії і ерозії  $C_1$  розраховуємо по формулі:

$$C_1 = P \cdot \tau + C_э, \quad (5.9)$$

де  $P$  - швидкість проникнення корозії;

$\tau = 10$  років - розрахунковий термін служби теплообмінника;

$C_э$  - добавка для компенсації ерозії, мм.

Добавку для компенсації ерозії не враховуємо, ухвалюючи, що теплообмінник працює із чистими рідкими середовищами (без твердих абразивних часток)

Швидкість проникнення корозії для матеріалу міжтрубного простору ухвалюємо  $P_k = 0,02$  мм/рік, а трубного -  $P_{\tau} = 0,1$  мм/рік.

Добавка для компенсації корозії становить:

- для труб з боку трубного і міжтрубного просторів

$$C_{1T} = 1,2 \text{ мм}$$

- для кожуха

$$C_{1K} = P_k \cdot \tau = 0,02 \cdot 10 = 0,2 \text{ мм}$$

Добавку для компенсації мінусового допуску  $C_2$ , мм, ухвалюємо по стандарту [18].

### 5.3 Розрахунок кожуха теплообмінника

Розрахункову товщину стінки кожуха від дії внутрішнього тиску визначаємо за формулою:

$$S_{\text{рк}} = \frac{P_{\text{к}} \cdot D}{2 \cdot [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi_{\text{р}} - P_{\text{к}}}, \quad (5.10)$$

де  $P_{\text{к}}$  – розрахунковий тиск у міжтрубном просторі теплообмінника при розрахунковій температурі, МПа;

$D = 418$  мм - внутрішній діаметр обичайки кожуха, мм;

$\varphi_{\text{р}}$  - коефіцієнт міцності поздовжніх зварених швів.

$$S_{\text{рк}} = \frac{0,6 \cdot 418}{2 \cdot 146 \cdot 1,0 - 0,6} = 0,86 \text{ мм.}$$

Відповідно до галузевого стандарту [18] виконавчу товщину стінки кожуха приймаємо рівною  $S_{\text{к}} = 4$  мм. Додаток для компенсації мінусового допуску для сталевих листів товщиною 4 мм складає  $C_{2\text{к}} = 0,5$  мм. Додаток

$$C_{2\text{к}} = 0,5 > 0,05 \cdot S = 0,05 \cdot 4 = 0,2 \text{ мм}$$

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

Сума додатків до розрахункової товщини стінки кожуха складає

$$C_{\text{к}} = C_{1\text{к}} + C_{2\text{к}}. \quad (5.11)$$

$$C_{\text{к}} = 0,2 + 0,5 = 0,7 \text{ мм.}$$

Виконавчу товщину стінки кожуха визначаємо за формулою

$$S_{\text{к}} \geq S_{\text{рк}} + C_{\text{к}}. \quad (5.12)$$

$$S_{\text{к}} \geq 0,86 + 0,7 = 1,56 \text{ мм.}$$

Остаточно приймаємо виконавчу товщину стінки кожуха рівною  $S_{\text{к}} = 4$  мм [18].

Допустимий внутрішній надлишковий тиск в кожусі визначаємо за формулою

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_{\text{р}} \cdot (S - C)}{D + (S - C)}. \quad (5.10)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 146 \cdot 0,9 \cdot (4 - 1,56)}{418 + (4 - 1,56)} = 1,53 \text{ МПа.}$$



Умова міцності

$$P_k = 0,6 \leq [P]_k = 1,53 \text{ МПа}$$

виконується.

Умова застосування розрахункових формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{4 - 1,56}{418} = 0,006 \leq 0,1$$

виконується.

#### 5.4 Визначення товщини трубної решітки

Товщину трубної решітки приймаємо рівною 20 мм із наступною перевіркою на міцність та жорсткість.

Розрахунковий тиск визначаємо за формулою:

$$P = \max\{|P_T|; |P_k|; |P_T - P_k|\}, \quad (5.11)$$

$$P = \max\{0,6; 0,6; |0,6 - 0,6|\} = 0,6 \text{ МПа.}$$

Розрахункову товщину трубної решітки за умови міцності максимальної безтрубної зони визначаємо за формулою:

$$S_{pp} = 0,5 D_e \sqrt{P/[\sigma]_p}, \quad (5.12)$$

де  $D_e = 21,3$  мм [19] – діаметр окружності, вписаної в максимальну безтрубну зону, визначаємо конструктивно.

$$S_{pp} = 0,5 \cdot 21,3 \sqrt{0,6/140} = 0,7 \text{ мм.}$$

Виконавчу товщину трубної решітки за умови міцності максимальної безтрубної зони визначаємо за формулою:

$$S_p \geq S_{pp} + C_p = 0,7 + 2,0 = 2,7 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт ослаблення трубної решітки визначаємо за формулою:

$$\varphi_p = 1 - d_0/t_p. \quad (5.13)$$

$$\varphi_p = 1 - 25,15/32 = 0,214.$$

Розрахункову товщину трубної решітки в перерізі канавки під подовжню перегородку визначаємо за формулою:

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{pp}} \cdot \max \left\{ 1 - \sqrt{\frac{d_0}{b_n} \cdot \left( \frac{t_n}{t_p} - 1 \right)}; \sqrt{\varphi_p} \right\}; \quad (5.14)$$

$$S_{\text{пр}} = 0,7 \cdot \max \left\{ 1 - \sqrt{\frac{25,15}{8} \cdot \left( \frac{55,4}{32} - 1 \right)}; \sqrt{0,214} \right\} =$$

$$= 0,7 \cdot \max\{-1,3; 0,463\} = 0,347 \text{ мм.}$$

Товщина трубної решітки в перерізі під подовжню перегородку в розподільній камері має бути не менше

$$S_n = S_{\text{пр}} + C_p = 0,347 + 2,0 = 2,347 \text{ мм.}$$

З конструктивних міркувань приймаємо товщину трубної решітки в перерізі канавки під подовжню перегородку в розподільній камері рівною 18 мм.

## 6 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ХОЛОДИЛЬНИКА

### 6.1 Виготовлення обичайок

Обичайки є базовою деталлю всіх теплообмінних апаратів. Вони бувають:

- жорсткі, які не змінюють форми поперечного перерізу під дією власної ваги;

- нежорсткі;

- товстостінні.

Основними геометричними розмірами обичайок є:

D - діаметр обичайки - стандартизований;

H - висота (довжина) обичайки;

S - товщина стінки.

За формою обичайки діляться на гладкі і зі спеціальними ребрами, відбортовками, зигами.

В якості заготовок для обичайок можуть служити: листовий метал, лиття, поковки, труби.

Технологічний процес виготовлення обичайки включає наступні технологічні операції:

- розконсервування і очищення;

- правка листового прокату;

- розмітка та розкрій листових заготовок;

- різка листа на заготовки необхідного розміру;

- обробка крайок під зварювання;

- складання заготовок;

- зварювання карт;

- гнуття (вальцювання) обичайок;

- зварювання стикових швів;

- калібрування і правка після зварювання;

- контрольні операції.

Обичайки циліндричних елементів виготовляють безшовними з поволок або звареними з листів. Вальцовку і штампування обичайок допускається проводити тільки на відповідних машинах або пресах. Виготовлення обичайок ручним способом, а також місцевий нагрів і правка молотом не допускаються.

Відповідно до ОСТ 26-291-71 обичайки апаратів діаметром до 600 мм повинні виготовлятися з одним поздовжнім швом, крім тих, корпуси яких виготовляють з двох полуобичайок.

Обичайки діаметром понад 600 мм допускається виготовляти з декількох листів максимально можливої довжини. Допускається вставка шириною не менше 400 мм.

Обичайки посудин, що працюють під тиском, можуть бути виготовлені вальцюванням карт, зварених в плоскому стані з декількох листів. Зварні шви в обичайках, зварених з карт, повинні бути розташовані паралельно твірної, ширина листів між швами - не менше 800 мм, а ширина вставки, що замикає - не менше 400 мм. Поперечні зварні шви в сусідніх листах повинні бути зміщені. Для посудин і апаратів, виготовлених з карт, допускаються перехресні зварні шви за умови роботи цих судин або апаратів під тиском до  $16 \text{ кгс} / \text{см}^2$  і при температурі до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ; при виконанні цих швів автоматично або електрошлаковим зварюванням.

Вальцювання обичайок з листа супроводжується пластичною деформацією. При вальцюванні в холодному стані пластична деформація призводить до залишкових напружень і наклепу. З метою обмеження залишкових напружень в металі після холодного згинання при відношенні товщини стінки обичайок до внутрішнього радіусу, рівному 5% або при перевищенні цієї величини, слід або піддавати термічній обробці готові обичайки, або виготовляти їх гарячим способом (нагрів листа до температури близько  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; закінчення гнуття не нижче  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Отже, мінімально допустимий внутрішній діаметр обичайки при виготовленні її без нагріву

дорівнює сорокократній товщині листа. Це співвідношення слід враховувати також при виправленні вм'ятин під час ремонтів.

Гнуття обичайок з листів виконують на тривалкових або чотирьохвалкових листозгинальних вальцях, а також на згинальних пресах. Листозгинальні машини застосовують для вальцювання обичайок з листа товщиною до 50 мм. У цих машинах гнуття листа здійснюється обертовими валками. У тривалкових машинах згинаючим є середній валок, а в чотирьохвалкових - бічні валки. Лист, який підлягає вальцюванню, вводять в валки і згинають його переміщенням вниз середнього валка (тривалкова машина) або підйомом вгору бічних валків (чотирьохвалкова машина). Згинання роблять за кілька пропусків. Після кожного пропуску кривизну листа збільшують до отримання замкнутої циліндричної обичайки.

## **6.2 Виготовлення днищ**

По конструкції днища бувають:

- еліптичні;
- конічні;
- торосферичні;
- сферичні;
- плоскі;
- тарілчасті.

За технологічною ознакою вони діляться на:

- тонкостінні;
- товстостінні;
- жорсткі;
- нежорсткі.

Послідовність проведення технологічних операцій при виготовленні днищ така ж, як і для обичайок. Різниця полягає в операції формування, яка може здійснюватися:

- методом штампування на пресах;
- методом ротаційного видавлювання.

Штампування на пресах здійснюється зазвичай в гарячому стані. При цьому основний недолік - це термічна усадка.

Штампування в холодному стані простіше по реалізації в промислових умовах. Разом з тим воно вимагає більш дорогої сталі для штампового оснащення, необхідності термічної обробки після штампування для зняття наклепу, а також подальшої правки після термообробки. Головним же недоліком при виготовленні днищ холодної штамповкою є високі залишкові напруги, які викликають тріщини в металі.

Метод ротаційного видавлювання полягає в тому, що формоутворення днищ проводиться роликми з малою зоною пластичної деформації, локалізованої на незначній частині заготовки, що обертається. Деформація заготовки здійснюється на універсальних давильних верстатах. Основним дефектом при виготовленні днищ методом ротаційного видавлювання є їх різнотовщинність по перетину деталі.

Так як днище є базовою деталлю в апаратобудуванні, то потрібна висока точність його розмірів і форми заготовки, яка б гарантувала якісну збірку днища з обичайкою. З цією метою після технологічного процесу формування днища проводять його калібрування, що дозволяє істотно підвищити точність розмірів і знизити похибку форми (овальність) виробу.

### **6.3 Виготовлення трубної решітки**

Трубні решітки є одними з найважливіших деталей теплообмінної апаратури. У решітках закріплюються труби, а самі решітки найчастіше приварюють до корпусу апарата або фіксують за допомогою фланцевого з'єднання. Твердість матеріалу повинна бути вище, ніж у труб.

Трубні решітки бувають зварні і цільні. Заготовки - листовий прокат.

Технологія обробки включає наступні групи операцій:

- розконсервування, очищення, розмітка, різання прокату;
- обробка кромки, зварювання карт, термообробка;
- точіння;
- фрезерування пазів, в які встановлюють перегородки;
- розмітка отворів під свердління;
- свердління отворів;
- розточування ущільнювачів канавок і фасок в отворах під труби.

#### **6.4 Встановлення штуцерів**

Після розмітки корпусу виробляється вирізка отворів для установки люків, штуцерів й інших елементів арматури апарата. Отвори для установки штуцерів на обичайці й днищі розміщують на відстані від краю ближнього зварного шва до осі отворів на відстані не менш 0,9 діаметра отвору. Відстань між центрами двох сусідніх отворів у циліндричній обичайці по зовнішній поверхні повинне бути не менш 1,4 діаметри отвору або 1,4 напівсуми діаметрів отворів, якщо діаметри їх різні. На днищах відстань між кромками двох сусідніх отворів приймають не менш діаметра меншого отвору. Не допускається розташовувати отвори на зварних швах. На поздовжніх швах обичайки допускається установка штуцера діаметром не більше 150 мм при відстані між центрами двох сусідніх штуцерів не менш суми діаметрів їхніх отворів на радіусі. У кільцевих швах обичайки установка штуцерів не обмежується. У зварних швах днищ установка штуцерів може бути зроблена тільки після 100% контролю зварених швів просвічуванням або ультразвуковою дефектоскопією. Заготовки для фланців одержують вигином прокату. Технологічний процес виготовлення заготовок по цьому методу полягає в розрізі смуги або профілю на мірні заготовки, згинанню в кільце й стиковому зварюванню. Далі заготовки піддають механічній обробці, обробляють ущільнювальні поверхні й внутрішній діаметр фланця. Потім висвердлюються отвори під болти. Фланці штуцерів штампують у відкритих

штампах. За один хід пресу прошивають отвори й обрізають заусенці на кривошипних пресах у комбінованих штампах. Отримані заготівлі також механічно обробляють. При збиранні плоских фланців з патрубками необхідно забезпечити рівномірний кільцевий зазор між патрубком і фланцем. Зазор між зовнішньою поверхнею патрубка (обичайки) і стінкою отвору плоского фланця не повинен перевищувати 2,5 мм.

Зварювання штуцерів із плоским фланцем виробляються в такий спосіб: штуцер укладається ущільнювальною поверхнею на складальну плиту, по внутрішньому діаметру встановлюються підкладки, по товщині рівні товщині підведення й торця патрубка до сполучної поверхні фланця. Патрубок торцем укладається у фланець на підкладку. Витримується перпендикулярність осі щодо ущільнювальної поверхні фланця. Патрубок прихоплюється й потім приварюється до фланця.

## **6.5 Процес збирання теплообмінника**

Технологія збирання кожухотрубчатих теплообмінників включає в себе цілий ряд операцій, в результаті яких окремі вузли і деталі з'єднуються в готові вироби. Особливі вимоги до точності складання стосуються в першу чергу вузлів з'єднання трубного пучка з решіткою і решітки з корпусом теплообмінника.

Граничні відхилення розмірів в місцях кріплення труб до решітки не повинні перевищувати допустимих.

Кріплення труб в трубних решітках здійснюється обваркою з наступним розвальцюванням.

Для розміщення поперечних перегородок усередині кожуха на заданій відстані одна відносно до одної для їх кріплення використовують стяжки та розпірки. Стяжки представляють собою металеві стержні круглого перерізу, які вгвинчуються в трубну решітку і проходять через відповідні отвори в поперечних перегородках по всій довжині трубного пучка до останньої



перегородки, де вони закріплюються за допомогою гайок і стопоряться контргайками. Між трубною решіткою, в котру вгвинчуються стяжки, та суміжною з нею перегородкою, а також між усіма суміжними перегородками встановлюються дистанційні втулки (розпірки), які фіксують перегородки на заданій відстані одна відносно одної.

Загальна збірка (розподільної коробки, корпусу і ковпака). На складальний майданчик встановлюються корпус і трубний пучок. Нижня частина корпусу всередині змазується солідолом. На фланець корпусу з боку нерухомої решітки встановлюється прокладка. Трубний пучок збирається з корпусом і проводиться гідровипробування міжтрубного простору. Приварювальні поверхні фланців корпусу, розподільної коробки, плаваючої головки і різьбові поверхні шпильок і гайок очищуються від бруду та іржі, промиваються уайт-спіритом і покриваються антикорозійним мастилом (гарматним салом). Розподільна коробка встановлюється на нерухому решітку, її положення вивіряється за кресленням, після чого коробка з'єднується з фланцем корпусу. На розподільну коробку і кришку розподільної коробки встановлюються прокладки, півкільце і накладки. Далі встановлюються прокладки плаваючої головки і кришки. З'єднання коробки з корпусом головки і кришки, закріплення прокладок, а також ковпака в виконуються шпильками і гайками. Проводиться гідровипробування трубного простору. На ковпак встановлюються прокладки і знову проводиться гідровипробування трубного простору. Після обробки апарат подається в камеру для фарбування.

## **6.6 Випробування теплообмінника після виготовлення**

Для випробування кожухотрубчатого теплообмінника з плаваючою головкою застосовують пристосування (рис. 4.1), що складається з кожуха з привареними до нього фланцями. З трубного пучка теплообмінника знімають

плаваючу головку, встановлюють його в пристосування, затискають болтами з ним і випробовують на тиск описаним нижче способом.

Перед випробуванням кожухотрубчатого теплообмінника знімають кришку, заглушають всі штуцери міжтрубного простору, крім одного, через який теплообмінник заповнюють водою, випускаючи повітря через повітряник. Потім за допомогою насоса піднімають тиск до випробувального і витримують його протягом 5 хв. При цьому стежать за показанням манометра: при наявності нещільності в трубному пучку тиск падає.

Падіння тиску можливе і через дефекти розвальцьовування. Це підтверджується появою вологих плям і крапель води в місцях розвальцьовування. Якщо дефектів розвальцьовування не виявлено, а тиск продовжує падати, зливають воду і в міжтрубний простір дають пар. Трубку, яка пропускає пар, заглушають пробкою або замінюють новою. Недовальцьовані трубки довальцьовують або замінюють новими. Після цього гідравлічне випробування повторюють. Усунувши всі дефекти в трубному пучку і решітках, встановлюють кришки і заповнюють водою трубний простір. Падіння тиску в цьому випадку вказує на пропуски у фланцевих з'єднаннях кришок і корпусу, які слід усунути.

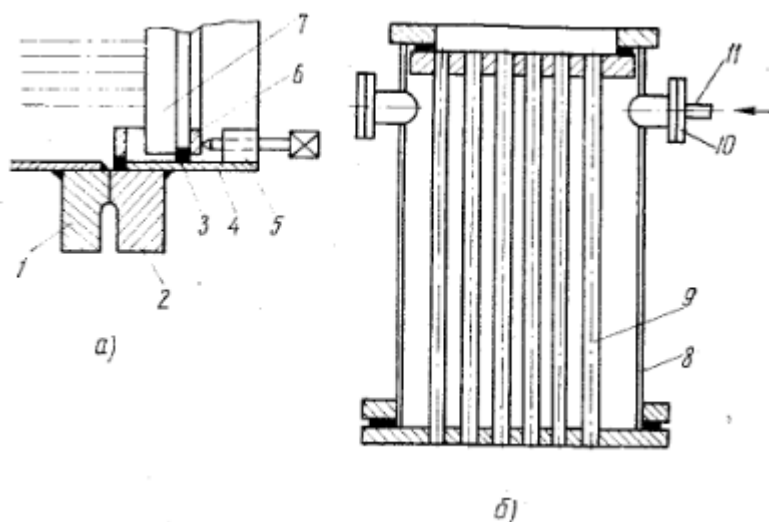


Рис. 6.1. Пристрій для опресовування теплообмінників з плаваючою ГОЛОВКОЮ:

а - пристрій для опресовування трубного простору, б - пристрій для опресовування міжтрубного простору; 1 - фланець корпусу теплообмінника, 2 - фланець пристрою, 3 - ущільнювальне гумове кільце, 4 - обичайка пристрою, 5 - гайка, приварена до обичайки, 6 - кільце нажимне, 7 - трубна решітка, 8 - корпус, 9 - трубний пучок, 10 - штуцер для подачі води, 11 - люк

Всі роботи по випробуванню знову встановлених та відремонтованих теплообмінників бригада слюсарів веде в присутності працівників технічного відділу, відповідальних за проведення ремонту, а в разі ремонту апарату, якому належить працювати при тиску 0,7 атм і вище, і представника Госгортехнагляду. Після закінчення випробувань складається акт, в якому зазначаються всі виконані ремонтні роботи і результати випробувань.

## **7 РЕМОНТ ХОЛОДИЛЬНИКА**

### **7.1 Метод виконання планово-попереджувального ремонту**

Правильна організація ремонтної служби на заводі має дуже важливе значення, так як від якості технічного обслуговування, своєчасності ремонту залежить безперебійна і ефективна робота заводу.

Ремонтна служба заводу здійснює технічне обслуговування і планово-попереджувальні ремонти всіх видів обладнання, апаратури, приладів, комунікацій, будівель і споруд, за винятком засобів зовнішнього транспорту. Боротьба з корозією також входить у функції ремонтної служби.

Технічне обслуговування та провадження ремонтів на заводі здійснюються за системою планово-попереджувального ремонту.

Система планово-попереджувального ремонту обладнання (ППР) являє собою сукупність організаційно-технічних заходів щодо нагляду та догляду за обладнанням, що здійснюються в плановому порядку, які дозволяють збільшити тривалість міжремонтного циклу роботи при скороченні простою обладнання в ремонті, а також попередити передчасний знос устаткування і забезпечити постійне підтримання його в працездатному стані.

При цій системі ремонтні роботи виконують за планом, узгодженим з планом виробництва, при своєчасній підготовці для ремонту запасних частин, матеріалів та робочої сили.

Система ППР дозволяє широко впроваджувати при ремонті обладнання передову технологію, швидкісні методи, механізацію важких і трудомістких робіт, а також здійснювати заходи щодо модернізації і підвищення довговічності обладнання.

Системою ППР передбачені наступні види обслуговування і ремонту: поточне обслуговування, щоденний нагляд, плановий огляд, плановий поточний ремонт, плановий середній ремонт, плановий капітальний ремонт.

Поточне обслуговування і щоденний нагляд за обладнанням заводів здійснюють обслуговуючий персонал і чергові слюсарі.

Плановий огляд здійснюється за графіком з метою перевірки технічного стану обладнання, апаратури, арматури і трубопроводів для виявлення дефектів, що підлягають усуненню при найближчому ремонті.

Поточний ремонт є основним видом ремонту, за допомогою якого обладнання повинно підтримуватися в працездатному стані. Поточним називається такий ремонт, коли шляхом відновлення або заміни частин, що швидко зношуються, обладнання та апаратура приводиться в справний стан, що забезпечує оптимальну потужність і безпеку роботи до наступного планового ремонту.

Поточний ремонт передбачається для окремих вузлів устаткування та апаратури, що піддаються найбільш швидкого зносу.

Середній ремонт відрізняється від поточного великим обсягом робіт, проведенням ревізії всієї апаратури і обладнання технологічної установки, а також здійсненням робіт з капітального ремонту окремих об'єктів установки.

Середній ремонт пов'язаний з більш тривалим простоем обладнання.

Капітальним ремонтом називається такий вид ремонту, коли шляхом відновлення або заміни окремих апаратів і машин, або зношених їх основних частин технологічним установкам повертається їх початковий справний стан, що забезпечує нормальну продуктивність, термін служби і безпеку роботи.

Фінансування капітального ремонту здійснюється за рахунок амортизаційних відрахувань основних засобів підприємства. Нарахування амортизації основних засобів здійснюється протягом усього терміну їх служби рівними частками, обчислювальними за встановленою шкалою у відсотках від первісної вартості основних засобів. При повній заміні обладнання внаслідок зносу, як, наприклад, насосів, компресорів, фільтрів, турбін, апаратів та іншого обладнання, його списують з балансу підприємства в установленому порядку, а нове обладнання набувають за рахунок коштів капітального будівництва.

Модернізація обладнання означає заміну в комплексі технологічної установки окремих агрегатів, апаратів, устаткування або часткову зміну їх конструкції з метою підвищення продуктивності, поліпшення умов обслуговування і подовження терміну служби.

Робота з модернізації обладнання здійснюється при черговому плановому ремонті технологічної установки.

Боротьба з корозією. Передбачається вивчення і аналіз всіх явищ корозії, розробка заходів щодо захисту обладнання від корозії і рекомендація їх заводоуправлінню для впровадження. Необхідно докладно записувати стан, ремонти, що проводяться і заміну деталей і вузлів, корозія яких викликає побоювання, проводити точний облік даних по боротьбі з корозією і ефективність застосованих заходів по окремих установкам і агрегатам. Сюди ж відносяться питання чистки апаратури хімічним шляхом, інструктаж виконавців і спостереження за виконанням робіт з хімічного чищення апаратури і обладнання.

## **7.2 Зупинка апарата в ремонт**

При плануванні роботи технологічних установок необхідно враховувати час для ремонту.

Періодичність планових ремонтів повинна призначатися так, щоб: а) забезпечувалася безперебійна робота обладнання від одного ремонту до іншого при мінімальному обсязі ремонтних робіт; б) встановлені періоди між ремонтами не були надмірно довгі і були економічно виправдані; в) період між двома ремонтами був оптимальним.

Норми часу роботи технологічних установок між ремонтами і простою їх на ремонті визначаються графіком безперервної роботи і простою на ППР цих установок.

Вибір правильних норм часу між ремонтами і простоем установки в ремонті є одним з відповідальних питань організації, експлуатації та ремонту технологічних установок.

На основі глибокого аналізу статистичних даних за тривалий період експлуатації технологічних установок і на основі вивчення всіх індивідуальних особливостей кожної установки, її пристосованості до того чи іншого виду сировини, технологічного режиму, умов роботи і ремонту повинні встановлюватися оптимальні міжремонтні пробіги установок. Оптимальні подовжені міжремонтні пробіги установок повинні прийматися так, щоб робота установок була повноцінною, з високими виробничими показниками протягом усього міжремонтного пробігу і без значного погіршення стану апаратури і обладнання.

Норма часу простою установки для ремонту враховує календарний час простою обладнання в ремонті і включає час, необхідний на безпосередній ремонт, а також на охолодження, дегазацію, нейтралізацію, чистку, промивку, продування паром і інертним газом апаратури, подальше випробування і пуск обладнання.

При цьому необхідно на дослідно-промисловій або пілотній установці процесу, що освоюється визначити корозійні властивості різних продуктів і їх вплив на обладнання установки. На підставі аналізу отриманих даних встановити норму часу міжремонтного циклу, яка підлягає в подальшому коригуванню на основі досвіду роботи.

### **7.3 Основні дефекти, які виикають при експлуатації апарата та методи їх усунення**

У кожухотрубчатому теплообміннику з плаваючою головкою одна з трубних решіток апарата не прикріплена до корпусу. Внаслідок рухливості решітки всі температурні деформації сприймаються корпусом і трубним пучком самостійно. Пристрій цих теплообмінників складніше жорстких:

кожух (корпус) і пучок труб з решітками і поперечними перегородками роз'ємні, а вільна трубна решітка має своє днище і разом з ним складає так звану плаваючу головку. Підготовка теплообмінника до ремонту і його промивка, способи очищення внутрішніх поверхонь труб і усунення виявлених дефектів такі ж, як і для теплообмінників жорсткої конструкції. Дещо специфічною є лише методика визначення дефектів.

Обпресовуючи міжтрубний простір на контрольний тиск, перевіряють герметичність корпусу і днища, а також їх сполучень. Після спуску обпресувальної води при відкритій спускній муфті на днище корпусу перевіряють трубний простір, виявляючи дефекти розподільної камери і сполучень. Поява води на днищі корпусу вказує на наявність дефекту в трубному пучку. Характер цього дефекту може бути з'ясований тільки після розбирання днища корпусу при повторній опресовці трубного простору. Візуально можна встановити тільки пропуск в сполученні кришки плаваючої головки з рухомою решіткою і порушення з'єднання труб з цією решіткою. Такі дефекти усувають насамперед шляхом зміни прокладки на кришці (підтяжки болтів без зміни прокладки слід уникати) і перевальцовки або зварювання кінців труб. Якщо після цього при опресовці вода все ж проникне в міжтрубний простір, значить порушена герметичність з'єднання труб з нерухомою трубною решіткою або зносилися одна або кілька труб.

Для точного встановлення дефекту розбирають кришку розподільної камери і плаваючої головки і з боку рухомої решітки до корпусу прикріплюють приставну головку. По течі на торцях решіток при обпресуванні корпусу судять про нещільне вальцювання (зварювання); при зносі труби в ній з'являється обпресувальна вода.

При наявності великої кількості пошкоджених труб трубний пучок витягують з корпусу і замінюють новим. Зміна трубних пучків - операція трудомістка, тому для її виконання повинні бути підготовлені засоби механізації. Практикується застосування спеціальних екстракторів (їх жорстко кріплять до корпусу апарата), вони підтримують напрямок пучка і не



допускають його защемлення в корпусі в результаті провисання під впливом власної ваги.

У тих випадках, коли пучок важко витягти з корпусу, застосовують лебідку або трактор, троси яких кріплять до нерухомої решітки. Для цього на ній повинні бути передбачені отвори з нарізкою під рами. Використовують також самохідні крани, якщо можливий їх безперешкодний в'їзд на територію установки.

Щоб полегшити вилучення та установку пучків на місце, до трубних решіток приварюють ребра жорсткості, якими вони спираються на внутрішню поверхню корпусу. Цьому ж сприяють катки, наявні у пучків труб в горизонтально розташованих великих теплообмінних апаратах. Ребра жорсткості і катки запобігають заклинювання і защемлення при переміщенні пучка вздовж корпусу.

Пучки витягують з корпусу, якщо необхідна чистка зовнішніх поверхонь теплообмінних труб і внутрішніх поверхонь корпусу. Чистка поверхні корпусу труднощів не становить, чистка ж зовнішніх поверхонь труб пучка дуже складна. Залежно від ступеня забрудненості і складу відкладень застосовують промивання, пскоструювання і механічне чищення. При промиванні пучок труб розміщують у ванні з гасом, соляровим маслом або кислотою. Суміш підігрівається парою і за допомогою насоса подається в ванну з розчином. Після закінчення промивання циркуляція рідини припиняється, бруд осідає в збірнику, з якого вона потім спускається.

Тверді відкладення видаляються за допомогою піскоструйного апарату або чистилок. У першому випадку відкладення попередньо висушуються пропарюванням або при нагріванні гарячим повітрям. Цими способами добре очищаються пучкі труб, розташовані по вершинах квадрата (коридорно). При шаховому розташуванні труб таким способом можна чистити тільки поверхні периферійних труб. Тому коли теплообмінні труби за обраною схемою теплообміну омиваються забрудненою рідиною, труби пучка повинні бути

розташовані тільки по вершинах квадрата. Механічна чистка зовнішніх поверхонь труб неможлива, якщо пучок складений з ребристих труб.

Очищений пучок труб перед установкою в корпус слід спресувати. Для цього збирають плаваючу головку, а до нерухомої решітки на болтах під'єднують спеціально виготовлене днище.

Пучок повинен бути оснащений захисним відбійним листом, що дозволяє запобігти інтенсивний ерозійний знос на ділянках входу середовища в корпус теплообмінника. Відбійний лист (козирьок) забезпечує також більш повне змивання середовищем початкових ділянок труб. Зношені козирьки замінюють новими, надійно прикріпленими до труб. У деяких конструкціях їх приварюють з одного боку до нерухомої решітки, а з іншого - до першої поперечної трубної перегородки.

Плаваюча головка працює в складних умовах: її кріпильні деталі постійно знаходяться в рідині, що заповнює корпус. У нормалізованих теплообмінників кришки плаваючої головки щільно притискаються до рухомої решітки трубного пучка нажимними гвинтами, укрупченими в спеціальні півкільця - фланцеві скоби. Ці скоби надягають з тильного боку на трубну решітку, що має для цієї мети виточку. Така конструкція хоча і забезпечує компактність, але має істотний недолік: при розбиранні і збірці натискні гвинти часто ломаються, особливо при циркуляції в міжтрубному просторі забрудненої або агресивної рідини. Витягання ж поламаних гвинтів пов'язане зі значними витратами часу.

Цих недоліків позбавлені конструкції, в яких кришки плаваючих головок кріплять накладними фланцями і накладними півкільцями.

У першому випадку трубна решітка має на циліндричній поверхні виточку, в яку закладаються два півкільця прямокутного перетину. Півкільця служать заплечиками (упорами) для накладного фланця, що з'єднується шпильками з кришкою плаваючої головки. В результаті тривалої роботи в умовах високих температур або забрудненої рідини півкільця пригорають (прилипають) до поверхні виточки. Тому для вилучення півкільць в них

передбачені отвори з нарізкою, в які вкручують віджимні гвинти. При складанні перед установкою комбінованих фланців ці отвори заповнюють азбестом з графітом, що дозволяє зберігати різьблення при експлуатації.

У другому випадку для накидних півкілець з тильного боку рухомої решітки роблять відповідні виточки. Півкільця і кришки стягують шпильками.

Залежно від умов експлуатації в якості прокладки при сполученні рухомої решітки з кришкою застосовують азбестовий картон в оболонці з алюмінію марки АД, латуні, хромистих і нержавіючих сталей. При установці прокладки необхідно простежити за її цілісністю, збігом з областю сполучених поверхонь і рівномірністю затяжки болтів (рівномірною деформацією прокладки).

Ступінь затягування шпильок визначаються в залежності від температури середовища, що їх омиває. Якщо ця температура істотно перевищує температуру в трубному просторі, то шпильки затягують кілька сильніше звичайного, з огляду на їх подовження при нагріванні.

Розподільна камера призначена для розподілу рідини по трубах пучка. Вона забезпечена плоскими перегородками і має плоске або еліптичне (при діаметрах апарату більше 600 мм) днище. Нерухома решітка пучка затискається шпильками між фланцями камери і корпусу. Наявність кришок на розподільній камері дозволяє оглядати і ремонтувати перегородки і порожнину нерухомої решітки без зняття всієї камери.

У тих випадках, коли камеру доводиться знімати для ремонту, зручна конструкція кріплення, в якій дві шпильки, забезпечені заплечиками (буртами), проходять через вушка в нерухомій решітці і забезпечують нерухомість сполучення пучка з корпусом, а отже, і збереження прокладки. Перед ослабленням на цих шпильках гайок з боку камери необхідно перевірити, чи зашплінтовані гайки з протилежного боку. В іншому випадку їх додатково підтягують.

Здійснення щільного сполучення плоских перегородок розподільної камери з одного боку з нерухомою трубною решіткою, а з іншого боку з

кришкою самої камери вимагає від виконавця високої кваліфікації. Шляхом опресування важко встановити, наскільки щільні ці сполучення, тому зазвичай цей вузол залишається безконтрольним. Разом з тим в ряді випадків перевірка щільності сполучення перегородок абсолютно необхідна. Викривлені перегородки в камерах замінюють новими, пропуски в зварних швах заварюють заново, якість зварних швів перевіряють обмазкою крейдяним розчином і керосином.

## 8 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Охорона праці — це:

- система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини під час трудової діяльності;

- чинна (що діє на підставі відповідних законодавчих та інших нормативних актів) система соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, які забезпечують збереження здоров'я і працездатність людини під час праці.

- дозвіл на початок робіт підвищеної небезпеки, який необхідний організації чи підприємству, хто працює в будівництві.

Законодавство про працю містить норми і вимоги з техніки безпеки і виробничої санітарії, норми, що регулюють робочий час і час відпочинку, звільнення та переведення на іншу роботу, норми праці щодо жінок, молоді, гігієнічні норми і правила тощо.

Загальний нагляд за додержанням норм охорони праці покладено на прокуратуру, спеціальний — на професійні спілки. Контроль за безпекою праці здійснюють також, державні й відомчі спеціалізовані інспекції (Держгіртехнагляд, Держенергонагляд тощо).

### **Навчання та інструктаж.**

Навчання, інструктаж і перевірка знань є обов'язковою невід'ємною частиною виробничої діяльності з метою забезпечення кваліфікованого і безпечного для працівника і його оточення виконання своїх професійних обов'язків.

Усі працівники при прийнятті на роботу і в процесі виробничої діяльності повинні проходити на підприємстві навчання та інструктажі з питань охорони праці, пожежної і газової безпеки, технології робіт, а також

бути ознайомлені з правилами поведінки при виникненні аварійних ситуацій, аварій та пожеж.

Відповідальність за забезпечення необхідної кваліфікації і підготовки з питань охорони праці працівників в цілому по підприємству покладається на керівника підприємства, а в структурних підрозділах (цехах, службах, відділах) на керівників цих підрозділів.

### **Загальні правила безпеки на території підприємства.**

Основні виробничі об'єкти підприємства, що мають нафтопереробний і нафтохімічний профіль, насичені обладнанням і механізмами, містять в своїх системах значну кількість горючих, легкозаймистих і вибухонебезпечних рідин і газів. Тому на території підприємства потенційно можливі наступні небезпеки:

- виникнення пожежі та вибуху при розгерметизації обладнання та трубопроводів або при порушенні режиму роботи обладнання;
- отруєння працюючих парами нафтопродуктів, сірководнем та іншими шкідливими речовинами;
- обмороження працюють при попаданні зріджених газів на незахищені ділянки тіла;
- хімічні опіки кислотою, лугом;
- термічні опіки при зіткненні з гарячими частинами обладнання, трубопроводів, водяною парою, конденсатом і т.д. ;
- травмування обертовими і рухомими частинами насосів, компресорів та інших механізмів в разі відсутності або несправності огорожень;
- ураження електричним струмом в разі виходу з ладу заземлення струмоведучих частин електрообладнання або пробою електроізоляції, незастосування засобів захисту і т.д. ;
- можливість падіння при обслуговуванні обладнання, розташованого на висоті;
- можливість падіння в негерметичні колодязі промканалізації, приямки і т.п.;

- можливість травмування транспортними засобами.

З метою запобігання нещасним випадкам від наведених вище небезпечних факторів необхідно:

- дотримуватися внутрішній трудовий розпорядок і дисципліну праці;

- знати і виконувати вимоги нормативних актів про охорону праці, правила пожежної та газової безпеки, правила поводження з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту, первинними засобами пожежогасіння;

- тримати в порядку робоче місце, територію, технічно грамотно експлуатувати та утримувати технологічне обладнання, машини, механізми; постійно підвищувати професійний рівень;

- знати небезпечні і шкідливі властивості обертаються на робочому місці і на підприємстві в цілому речовин, дотримуватися правил поводження з ними;

- чітко і грамотно діяти відповідно до планів локалізації і ліквідації аварій та аварійних ситуацій;

- вміти надавати першу допомогу постраждалим, а також виконувати інші вимоги охорони праці.

### **Безпечна експлуатація технологічних установок.**

Кожен працівник зобов'язаний строго дотримуватися сам і вимагати від поруч працюючих (в тому числі від працівників сторонніх організацій) виконання встановлених правил, норм та інструкцій з безпечних прийомів праці.

Під час виконання своїх трудових обов'язків працівники зобов'язані користуватися встановленою для них спецодягом, спецвзуттям, касками, іншими засобами особистої і колективної захисту. Перебувати на проммайданчику установок і резервуарних парків або виконувати будь-які роботи на її території, в тому числі господарські у відкритій літнього взуття (босоніжки, сандалі), або без інших засобів захисту, забороняється.

Все технологічне обладнання повинно експлуатуватися відповідно до технічних умов заводу-виготовлювача, технологічним регламентом і діючими нормами і правилами безпечної експлуатації технологічного обладнання та резервуарів.

Приступати до пуску після ремонту установки (апарату, насосно-компресорного та іншого обладнання) дозволяється тільки після оформлення відповідного акта і прийняття її (його) в експлуатацію спеціальною комісією.

Перед пуском установки (ділянки, об'єкта) необхідно:

- перевірити правильність монтажу, наявність і справність обладнання, трубопроводів, запірної арматури, КВП і АСУТП, засобів СБ і ПАЗ, заземлюючих пристроїв, вентиляції, каналізації, засобів пожежогасіння та індивідуального захисту;

- перевірити наявність технологічних регламентів, інструкції, ПЛАСів, аварійних комплектів інструментів і протигазів;

- перевірити стан майданчиків обслуговування і території пускаемого об'єкта.

Пуск або експлуатація установки з несправною системою парогасіння, або при несправності, відсутності або недостатньою комплектності інших засобів пожежогасіння не допускається.

Забороняється будь-яке виправлення чи ремонт рухомих частин працюючого насосно-компресорного та іншого обладнання. Рухомі і обертові частини насосів, компресорів, мішалок та інших механізмів повинні бути огорожені. Огорожа повинна бути жорстким і надійно закріпленим.

Електрообладнання, щити харчування і переносний електроінструмент повинні бути заземлені.

Всі роботи з переключення та ремонту електроустаткування, електромереж, по заміні світильників і т.п. повинні виконуватися тільки електротехнічним персоналом, який обслуговує цю ділянку.



Електрообладнання, освітлювальне обладнання та електрокомунікації повинні експлуатуватися відповідно до вимог «Правил улаштування електроустановок».

При роботі на установках забороняється:

- виконувати роботи, не передбачені інструкцією і без відома безпосереднього керівника, крім робіт з ліквідації аварійних ситуацій;
- приступати до нової роботи без інструктажу на робочому місці, встановленої спецодягу та засобів особистого захисту;
- працювати на несправному обладнанні і несправним інструментом;
- відволікатися від своєї роботи і відволікати інших;
- залишати працююче обладнання без нагляду;
- експлуатувати обладнання з несправними захисними пристроями або без них;
- використовувати трубопроводи в якості тимчасових опор;
- відігрівати заморожений ділянку трубопроводу без відключення його від системи і працювати при наявності заморожених ділянок.

#### **Обслуговування обладнання.**

За технічним станом та справністю апаратів, запірної арматури, запобіжних клапанів, які обслуговують майданчиків і сходів повинен бути забезпечений систематичний нагляд.

Дренажі колон і інших технологічних апаратів під час пуску і подальшій роботі повинні бути відглушені.

При виявленні пропусків в корпусах або місцях з'єднань колон, теплообмінників, ємностей та інших апаратів з горючими продуктами необхідно негайно подати пар до місця пропуску для запобігання займання продукту. При наявності умов, які загрожують аварією, негайно вимкнути даний апарат з роботи, скинути з нього тиск і звільнити від продукту.

При пуску, перемикання, перехід з працюючого обладнання на резервне необхідно перевіряти правильність складання технологічної схеми і готовність включається обладнання до роботи.

Перед включенням теплообмінників необхідно перевіряти правильність їх кріплення на опорах. Кріплення повинно бути виконано з урахуванням можливих температурних розширень.

Теплообмінники спочатку включають по холодному продукту, а потім подають теплоносій. Відключення теплообмінників проводиться в зворотному порядку. При включенні холодильників спочатку налагоджується рух по водяному простору.

Піддавати оребрені трубки теплообмінників повітряного охолодження ударного навантаження і ходити по ним забороняється.

При розташуванні апаратів в заглиблених місцях, управління запірною арматурою і приладами має бути винесено на поверхню. Світлові люки, розташовані на перекритті підземних ємностей, повинні бути закриті кришками на прокладках з допомогою кріпильної арматури.

Прямки (шахти) підземних ємностей повинні мати природну і постійно діючу штучну вентиляцію і повинні бути обладнані маршовими сходами, що відповідають вимогам правил.

Спуск в прямки та шахти дозволяється тільки в засобах індивідуального захисту та в присутності спостерігача. Спуск, коли вентиляція не повинен проводитися з дотриманням усіх вимог правил при виконанні газонебезпечних робіт.

Вентиляційні труби підземних ємностей повинні бути виведені на висоту не менше двох метрів від рівня землі.

За всіма апаратами повинен здійснюватися технічний нагляд в відповідно до встановлених на підприємстві графіком.

В процесі експлуатації технологічного обладнання змінним персоналом повинен забезпечуватися систематичний контроль за його технічним станом, а також справністю приладів КППіА, технічних манометрів, запобіжних пристроїв, запірної арматури, майданчиків і сходів.

**Вимоги до робіт із застосуванням ручного електрифікованого інструменту.**

Електрифікований інструмент (далі - електроінструмент) за умовами безпеки поділяється на класи:

I - електроінструмент, у якого всі деталі, знаходяться під напругою, ізолювані і штепсельна вилка має заземлювальний контакт.

II - електроінструмент, у якого всі деталі, знаходяться під напругою, мають подвійну або посилену ізоляцію. Цей електроінструмент не має пристроїв для заземлення.

Номінальну напругу електроінструмента I і II класів 220 В для електроінструмента постійного струму і 380 В - для електроінструмента змінного струму.

III - електроінструмент напругою не вище 42 В, у якого ні внутрішні, ні зовнішні кола не перебувають під іншою напругою. Електроживлення цього інструменту проводиться через розділовий трансформатор безпеки або перетворювача з окремими обмотками.

Для приєднання однофазного електроінструмента шланговий кабель повинен мати три жили: дві для харчування, одну для заземлення, а для трифазного електроінструмента застосовується чотирижильний кабель, одна жила якого слугує для заземлення.

Працівники, допущені до роботи з електроінструментом, повинні попередньо пройти навчання та перевірку знань з безпечного виконання робіт з застосуванням електроінструменту.

Під час кожного чергового видавання електроінструменту на виробництві, особою, відповідальною за збереження та справність електроінструменту, в присутності працівника мають бути перевірені:

- комплектність і надійність кріплення деталей;
- справність деталей корпусу, рукоятки та кришок щіткотримачів, наявність захисних кожухів та їх справність (зовнішнім оглядом);
- надійність роботи вимикача;
- задовільна робота на холостому ході.

Забороняється видавати для роботи електроінструмент, який не відповідає хоча б одній із перелічених вимог або електроінструмент з простроченою датою перевірки електроінструменту.

Безпосередньо перед роботою необхідно перевірити:

- відповідність напруги і частоти струму електричної мережі до напруги і частоти струму електродвигуна електроінструмента, зазначених на таблиці (паспортних даних);

- надійність закріплення робочого виконавчого інструмента (свердлильних, абразивних кругів, дискових пил і т.п.).

Забороняється підключати електроінструмент напругою до 12 В до електричної мережі загального користування через автотрансформатор, резистор або потенціометр.

Забороняється натягати, перекручувати кабель, ставити на нього вантаж, а також допускати перетинання кабелю живлення електроінструменту з тросами, кабелями та рукавами газозварювання.

Розбирати і ремонтувати самостійно електроінструмент, кабель, штепсельні з'єднання та інші частини електроінструменту працівникам працюють з електроінструментом забороняється.

Працювати електроінструментом з приставних драбин забороняється.

Обробляти електроінструментом обмерзлі, мокрі, а також які не закріплені деталі забороняється.

Залишати без нагляду електроінструмент, а так само передавати його особам, які не мають права роботи з електроінструментом забороняється.

Забороняється працювати електроінструментом, у якого закінчився термін періодичної перевірки, а також в разі виникнення хоча б однієї з таких несправностей:

- пошкодження штепсельного з'єднання, кабелю, або його захисної оболонки;

- пошкодження кришки вимикача;

- іскріння щіток на колекторі, що супроводжується круговим вогнем на його поверхні;

- витікання масла з редуктора або вентиляційних каналів, поява диму або специфічного запаху, характерного для ізоляції, що горить;

- поява підвищеного шуму, стуку, вібрації, поломка або поява тріщин в корпусних деталях, рукоятці, захисному штирі штекера.

Зберігати електроінструмент та допоміжне обладнання до нього слід у сухому приміщенні, обладнаному стелажми, полицями, ящиками, надійно забезпечують його збереження, згідно з вимогами до умов зберігання, зазначеними в паспорті електроінструмента.

Складувати електроінструмент в два ряди і більше без спеціальної упаковки забороняється.

### **Вимоги до електрозварювальних робіт та обладнання.**

Електрозварювальне обладнання має відповідати вимогам ГОСТ 12.2.007.8 та ПУЕ.

До електрозварювальних робіт допускаються працівники, не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, спеціальну підготовку та перевірку теоретичних і практичних навичок, знань інструкцій з охорони праці та мають кваліфікаційне посвідчення з записом про допуск на виконання цих робіт.

Зварювальні трансформатори з джерелом змінного струму повинні бути обладнані обмежувачами напруги холостого ходу, які забезпечують зниження напруги на електродах електрозварювального апарату з 60 - 80 В до 6 - 12 В після згасання дуги, що захищає зварника при випадковому дотику до робочого електроду.

Електрозварювальна установка заземлюється через спеціальний болт, який повинен бути на її корпусі.

Використання нульового робочого чи фазного проводу кабелю живлення для заземлення зварювального трансформатора забороняється.

Заземлення електрозварювальних установок слід виконувати до їх підключення до мережі і зберігати до відключення від мережі.

Сварка повинна проводитися із застосуванням двох проводів. Використання в якості зворотного проводу внутрішні залізничні рельси, мережі заземлення або занулення, а також провід та шини первинної комутації РУ, металеві конструкції будівель, комунікацій та технологічне обладнання забороняється.

Подавати напругу до зварюваного виробу через систему послідовно з'єднаних металевих стрижнів, рейок чи інших предметів забороняється.

Перед початком електрозварювальних робіт необхідно зовнішнім оглядом перевірити справність ізоляції зварювальних проводів та електротримачі, а також надійність з'єднання усіх контактів.

Відстань від зварювальних проводів до гарячих трубопроводів та балонів з киснем має бути не менше 0,5 м, до балонів та трубопроводів з горючими газами - не менше 1 м.

Користування електротримач у яких порушена ізоляція рукоятки забороняється, рукоятки електротримач повинні бути виготовлені із негорючого діелектричного та теплоізоляційного матеріалу.

Застосування саморобних електротримач забороняється.

Ремонт зварювальних установок слід виконувати тільки після зняття напруги.

При роботі з підручним або у складі бригади зварник перед запалюванням дуги зобов'язаний попередити оточуючих.

При виконанні зварювальних робіт усередині барабанів котлів та інших резервуарів і підземних споруд має бути призначено не менше 3 осіб, з яких двоє (спостерігають) повинні знаходитися поза резервуаром (спорудою), біля люка (лазу) і страхувати зварювальника за допомогою рятувальної мотузки, закріпленої за його запобіжний пояс.

При виконанні робіт всередині газонебезпечних підземних споруд та резервуарів застосування рятувальних поясів і канатів обов'язково.

У рятувальних поясів повинні бути наплічні ремені з боку спини з кільцем на їх перетині для закріплення рятувального канату. Пояс повинен

підганяти так, щоб кільце розташовувалось не нижче лопаток. Наглядачі не мають права відходити від люка резервуара чи підземної резервуара чи підземної споруди, поки в резервуарі знаходиться зварювальник.

При необхідності спуску до постраждалого, один зі спостерігачів повинен надіти кінець від рятувального каната який залишився зовні.

Допускати до місця роботи сторонніх осіб забороняється.

Сварка в замкнутих і важкодоступних просторах слід виконувати з дотриманням таких умов:

- наявності люків для прокладання комунікацій та евакуації працівників;

- безперервної роботи системи місцевої витяжної вентиляції та устаткування (повітроприймачів і ін.), які видаляють шкідливі речовини, що містяться в повітрі, до гранично допустимих концентрацій та підтримують вміст кисню в замкнених просторах не менше 20% за об'ємом;

- наявності у зварювальному обладнанні пристроїв припинення подавання захисного газу при відключенні або зникненні напруги у зварювальному колі;

- наявність обмежувача напруги холостого ходу під час ручного дугового зварювання змінним струмом. Обмежувач, виконаний у вигляді приставки, повинен бути заземлений окремим проводом.

Проводити електрозварювальні роботи під час дощу та снігопаду за відсутності намету над електрозварювальним обладнанням та робочим місцем електрозварника забороняється.

При електрозварювальних роботах у виробничих приміщеннях робочі місця зварювальників мають бути відокремлені від інших робочих місць і проходів негорючими екранами (ширмами, щитами) заввишки не менше 1,8 м.

При зварюванні на відкритому повітрі такі огорожі слід ставити у випадку одночасної роботи декількох зварювальників поблизу один від одного і на ділянках інтенсивного руху людей.

При електрозварювальних робіт у вогких місцях зварювальник повинен стояти на настилі із сухих дощок або на діелектричному килимку.

При будь-якому догляді з робочого місця зварювальник повинен відключити зварювальний апарат.

При електрозварювальних робіт зварювальник та його підручні повинні користуватись індивідуальними засобами захисту:

- захисною каскою із струмонепровідних матеріалів. Каска повинна зручно поєднуватися зі щитком, служить для захисту обличчя і очей;

- захисними окулярами з безбарвним склом для оберігання очей від осколків та гарячого шлаку під час зачищення зварених швів молотком або зубилом;

- рукавицями, рукавицями з крагами або рукавичками з негорючих матеріалів з низькою електропровідністю.

При електрозварювальних роботах або роботах із застосуванням електрифікованого інструменту в умовах підвищеної небезпеки ураження електричним струмом (всередині металевих резервуарів, ємностей, колон, реакторів і т. П.) Працівники, крім спецодягу, повинні використовувати діелектричні рукавички, калоші або килимки.

Працівники повинні бути проінструктовані про шкідливий вплив на зір та шкіру ультрафіолетових та інфрачервоних променів, що виділяються під час електрозварювання.

Особи, які виконують електрозварювання або присутні при ній, при появі болю в очах повинні негайно звернутися до лікаря.

### **Організація і безпечне проведення ремонтних робіт.**

При виконанні ремонтних робіт повинні строго дотримуватися:

- а) послідовність операцій і умови безпеки, які визначаються планом ведення робіт;

- б) заходи щодо забезпечення безпеки, передбачені нарядом-допуском;

- в) вимоги правил та інструкцій з охорони праці.



При проведенні ремонтних робіт в діючих цехах і на установках повинні бути забезпечений постійний контроль з боку технологічного персоналу за діями, поведінкою і роботою ремонтного персоналу.

Перед початком робіт відповідальний виконавець, видаючи майстру або бригадирам завдання, перевіряє разом з ним стан робочих місць, їх відповідність вимогам безпеки, виконання заходів, передбачених нарядом-допуском або планом проведення робіт, наявність засобів особистого захисту та ін.

При виконанні будівельно-монтажних і ремонтних робіт на діючій установці працівники цехів і сторонніх організацій, які виробляють ремонти, не повинні допускати захаращення робочих майданчиків, установок і територій навколо них, а після закінчення робіт зобов'язані прибрати будівельні відходи, невикористані матеріали та обладнання.

Розкритими котловани, траншеї і т.д. повинні захищатися силами тієї організації, яка справила розтин. Траншеї в місцях переходу обладнуються перехідними містками з огорожею.

Якщо працівники ремонтних організацій, перебуваючи на діючому об'єкті, помітять будь-які зміни в обстановці, виникнення ширяння, витоку газу або рідких продуктів і інші небезпеки, то вони негайно повинні припинити роботу, вийти в безпечне місце, доповісти про помічене начальнику об'єкта або змінному персоналу .

Відновлювати роботи можна тільки після виявлення і усунення причин та ліквідації начальника об'єкта або старшого по зміні.

При проведенні ремонтних робіт повинні бути передбачені заходи, що виключають пошкодження діючого обладнання і трубопроводів.

Працівники цеху, установки при порушенні правил безпеки, умов, визначених нарядом-допуском, або встановленого режиму проведення виконавцями робіт, зобов'язані заборонити проведення робіт на території об'єкта і поставити до відома про це керівника даного об'єкта.

Електричну апаратуру, освітлення, електроінструмент повинен виконати лише кваліфікований черговий електрик.

Підключення до системи пара і води, а також скидання конденсату, злив води з апаратів після опресування можна робити тільки за погодженням з начальником цеху або установки.

При необхідності проведення робіт на одній вертикалі робочі місця повинні бути обладнані відповідними захисними пристроями.

У процесі ремонту не допускається:

а) проведення пневматичних випробувань апаратів і трубопроводів без повного видалення працюють з небезпечної зони і розробки спеціальних заходів;

б) одночасне проведення вогневих робіт і робіт, що можуть викликати викид вибухонебезпечних або горючих продуктів (розтин обладнання і трубопроводів, їх продукту і т.п.).

#### **Ремонт ректифікаційних колон і випарників.**

Розтин люків колон і випарників повинно проводитися після пропарювання і промивання (продувки) апаратів відповідно до цеховими виробничими інструкціями.

При ремонті ректифікаційних колон розбирання тарілок слід проводити зверху вниз; деталі тарілок необхідно складати поза колони.

При роботі в декількох місцях по висоті всередині колони необхідно залишати одну не розібрався тарілку між працюючими бригадами для запобігання падінню з висоти деталей, інструменту, а також самих працюючих на працюючих внизу. На кожному робочому ділянці повинен бути відкритий люк-лаз для виходу працюючих. При цьому, в міру звільнення простору колони від внутрішніх пристроїв і, відповідно, збільшення відстані від люка, через який здійснюється вхід в колону і поверхнею ще не демонтованих тарілок, які працюють слід забезпечити випробуваною і зручними сходами для спуску і підйому, а також запобіжним поясом, закріпленим за надійний елемент конструкції зовні колони.

Для зовнішнього огляду тарілок колони або ремонту окремих її елементів проводиться частковий розбір тарілок «в шаховому порядку». В цьому випадку зняття (демонтаж) елементів (полотен) тарілок проводиться поперемінно, то на лівій секції, то на правій, по висоті, що виключає падіння і травмування працюючих.

До проникнення людей в апарат необхідно переконатися у відсутності загрози обвалення коксу зі стінок і верхньої кришки, падіння деталей або частин внутрішніх пристроїв.

Для спуску зверху колонних апаратів відходів при очищенні або будь-яких матеріалів вниз необхідно використовувати спеціальні пристрої, підвісні механізми (сміттєпроводи тощо).

### **Ремонт теплообмінних апаратів і холодильників.**

Роботи по зняттю кришок, виїмці трубних пучків, а також очищення труб теплообмінників повинні бути механізовані. Виїмка трубних пучків повинна проводитися відповідно до затверджених проектів виробництва робіт.

Для виробництва ремонтно-очисних робіт кожна група! теплообмінників повинна бути забезпечена підведенням пара, води, азоту.

Перед початком робіт трубне і міжтрубний простір теплообмінного апарату повинні бути продуті паром (азотом). При очищенні теплообмінної апаратури за допомогою гідромонітора повинні застосовуватися міцні і стійкі настили, а також повинен забезпечуватися відведення води з робочого майданчика.

Небезпечна зона при роботі гідромонітором повинна бути огорожена або позначена попереджувальними знаками і написами. Перебування сторонніх осіб у небезпечній зоні не допускається.

Робітники, допущені до самостійної роботи з гідромонітором повинні пройти спеціальне навчання і отримати достатні практичні навички в період стажування.

При роботі з гідромонітором обов'язково використання гідрозахисної спецодягу та засобів захисту очей.

## **Ремонт насосів і компресорів.**

Зупинка насосів і компресорів на ремонт і розбирання їх повинна проводитися з дозволу начальника установки.

Черговий робочий, поставлений у лазу зовні, зобов'язаний:

- стежити, щоб всі лази для входу і виходу з печі і отвори для вентиляції були відкриті;

- постійно підтримувати зв'язок з працюючими, щоб у разі потреби надати негайну допомогу;

- при неможливості надати допомогу особисто - негайно дати знати найближчим робітникам і повідомити адміністрацію.

При роботі всередині печі забороняється:

- скидати з верхніх лісів матеріали та інструменти;

- складати матеріали та інструменти у краю настилу;

- розбирати кладку великими брилами;

- розбирання потрібно вести по цеглині, спускаючи їх за спеціальним жолобу;

- вирубувати шлак на стінах без очок;

- проводити очищення труб;

- створювати на лісах, трубах і підвісках зосереджене навантаження за рахунок складання цегли кладки і т.п.

Трубчасті печі повинні бути обладнані електропроводкою напругою 12 вольт для живлення освітлювальної арматури при виконанні ремонтних робіт.

## ВИСНОВКИ

В дипломній роботі був виконаний проектувальний розрахунок ректифікаційної установки безперервної дії, в якому були визначені основні показники ректифікаційної колони, а також холодильника кубового залишку.

Конструкція холодильника, його основних складових одиниць і розрахунки виконані відповідно до діючої в хімічному машинобудуванні нормативно-технічної документації.

У ході виконання даної дипломної роботи були розраховані матеріальний і тепловий баланси. Виконано конструктивний розрахунок проектних апаратів, в ході якого визначено основні розміри запроектованої колони та теплообмінника:

- 1) діаметр колони – 1600 мм;
- 2) висота колони – 8800 мм;
- 3) відстань між тарілками – 300 мм;
- 4) кількість тарілок – 21 шт;
- 5) діаметр теплообмінника – 426 мм;
- 6) діаметр трубок – 25x2 мм;
- 7) довжина трубок – 3000 мм.

Визначено діаметри штуцерів, підібрані стандартні конструктивні елементи.

Накреслені графічна частина: технологічна схема ректифікаційної установки, загальний вигляд ректифікаційної колони, загальний вигляд холодильника, збірні одиниці апаратів.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
2. *Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З.* Процессы и аппараты химической технологии, 4-е изд. / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М.: Химия, 1967. – 848 с
3. *Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
4. *Плановский А.Н., Николаев П.И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии, 3-е изд. / А.Н. Плановский, П.И. Николаев.– М.: Химия, 1987. – 496 с.
5. Справочник химика, т. 5. – М.: Химия, 1968. – 975 с.
6. *Судаков Е.Н.* Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Справочник / Под редакцией Е.Н. Судакова, 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1979. – 568 с.
7. *Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И. и др.* Под ред. *Дытнерского Ю.И.* Основные процессы и аппараты химической технологии, 2-е изд., перераб. и дополн. / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский – М.: Химия, 1991. – 496 с.
8. *Кужель В.В., Смыкалов К.А., Ковалюк Н.И. и др.* Емкостные стальные аппараты завода «Павлоградхиммаш». Каталог. / В.В. Кужель, К.А. Смыкалов, Н.И. Ковалюк и др – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1989. – 32 с.
9. *Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В.* Равновесие между жидкостью и паром. Справочное пособие, книга 1-я и 2-я. / В.Б. Коган, В.М. Фридман, В.В. Кафаров. – М.-Л.: Наука, 1966. – 640 с. – 786 с.
10. *Ермаков В.И., Шеин В.С.* Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шеин – Л.: Химия, 1981. – 368 с.

11. *Кормильцин Г.С.* Основы диагностики и ремонта химического оборудования / Г.С. Кормильцин. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2007. – 120 с.

12. *Воробьева Г.Я.* Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств, 2-е изд., перераб. и дополн. / Г.Я. Воробьева. – М.: Химия, 1975. – 816 с.

13. *Поникаров И.И., Перельгин О.А. и др.* Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов / И.И. Поникаров, О.А. Перельгин – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

14. *Иванченко В.В., Архипов О.Г., Штонда Ю.М.* Конструювання та розрахунок колонних апаратів: навчальний посібник. / В.В. Иванченко, О.Г. Архипов, Ю.М. Штонда.– Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В.Даля. – 2015. – 324 с.

15. *Дытнерский Ю.И.* и др. Колонные аппараты. Каталог / Под ред. Ю.И. Дытнерского 2-е изд-во. – М.: ЦИНИНЕФТЕХИММАШ, 1978. – 220 с.

16. *Чернышев А.К., Коптелов В.Г., Листов В.В., Заичко Н.Д.* Основные теплофизические свойства газов и жидкостей. Номографический справочник / А.К. Чернышев, В.Г. Коптелов, В.В. Листов, Н.Д. Заичко. – Кемеровское изд-во, 1971. – 225 с.

17. Методичні вказівки до виконання курсової роботи на тему: «Розрахунок ректифікаційної установки безперервної дії» з дисциплін «Процеси та апарати хімічної промисловості» та «Процеси та апарати хімічних виробництв» (для студентів денної та заочної форм навчання за напрямами підготовки 6.051301 та 6.050503). Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 102 с.

18. Конструювання і розрахунок сталевих зварних посудин та апаратів. Обичайки та днища: / Укл. О.І. Барвін, І.М. Генкіна, В.В. Иванченко, Г.В. Тараненко, Ю.М. Штонда. Навч. посібник. – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля, 2005. – 310 с.

19. Іванченко В.В., Барвін О.І, Штонда Ю.М. Конструювання та розрахунок кожухотрубчастих теплообмінних апаратів: – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2006. – 208 с.