

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

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

## Кваліфікаційна робота бакалавра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"  
освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг  
обладнання хімічних виробництв"

Тема роботи: Абсорбційна установка для осушення природного газу. Розробити тарілчастий абсорбер

Виконав:  
студент групи ХМдн-72р

Шарай Володимир Олександрович

\_\_\_\_\_  
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Яхненко Сергій Михайлович

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

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

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

Курс 4 Група ХМдн-72р Семестр 8

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

Студенту Шараю Володимиру Олександровичу

1 Тема роботи: Абсорбційна установка для осушення природного газу.  
Розробити тарілчастий абсорбер

2 Вихідні дані: Розробити тарілчастий абсорбер для осушення природного газу продуктивністю 100 000 м<sup>3</sup>/год. Температура контакту газу в апараті 45°C. Точка роси мінус 5°C; тиск в апараті 100 ат.

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

1. Технологічна схема установки осушення природного газу – 1,0 арк.
2. Складальне креслення тарілчастого абсорбера – 1,5 арк.
3. Складальне креслення тарілки – 1,0 арк.

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р.О. Острога, М.С. Скиданенко, Я.Е. Михайловський, А.В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.; 2. Кузнецов А. А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности / А. А. Кузнецов, С. М. Кагерманов, Е. Н. Судаков. – Л. : Химия, 1974 – 344 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

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

6 Дата видачі завдання

жовтень 2020 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

доц. Яхненко С.М.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 49 с., 7 рис., 10 табл., 2 додатки, 24 джерела.

Графічні матеріали: технологічна схема установки осушення природного газу, складальне креслення тарілчастого абсорбера, складальне креслення тарілки – усього 3,5 аркуша формату А1.

Тема кваліфікаційної роботи «Абсорбційна установка для осушення природного газу. Розробити тарілчастий абсорбер».

У роботі наведено теоретичні основи та особливості процесу абсорбції вуглеводневих сумішей, виконані технологічні розрахунки процесу, визначені габаритні розміри апарата, проведено гідравлічні розрахунки, обґрунтований вибір матеріалу для виготовлення основних деталей і вузлів апарата, розраховане і вибрано допоміжне обладнання. Розрахунками на міцність і герметичність показана надійність роботи запроєктованого апарата. Окремим розділом представлені монтаж та ремонт тарілчастого абсорбера. У розділі «Охорона праці» розглянута сутність та будова занулення, сфера його застосування та вимоги до нього.

Ключові слова: УСТАНОВКА, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, ТАРІЛЧАСТИЙ АБСОРБЕР, ГЛІКОЛЬ, МОНТАЖ, РЕМОНТ, ЗАНУЛЕННЯ.

## Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	6
1.1 Опис технологічної схеми установки осушення природного газу	6
1.2 Теоретичні основи процесу абсорбції	8
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів	10
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	13
2.1 Технологічні розрахунки	13
2.2 Конструктивні розрахунки	24
2.3 Гідравлічні розрахунки	29
2.4 Вибір допоміжного обладнання	34
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	36
3.1 Визначення товщини стінки обичайки апарата	36
3.2 Визначення товщини стінки кришки і днища апарата	37
3.3 Розрахунок опори апарата	38
4 Монтаж та ремонт апарата	40
4.1 Монтаж апарата	40
4.2 Ремонт апарата	42
5 Охорона праці	45
Список використаних джерел	48
Додаток А – Графічне визначення числа теоретичних тарілок	
Додаток Б – Специфікації до графічної частини	

					<b>XI.A.00.00.00 ПЗ</b>		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Шарай				Лім.	Лист	Листів
Перевір.	Яхненко					4	49
Реценз.					<b>Тарілчастий абсорбер</b> Пояснювальна записка СумДУ, ХМдн-72р		
Н. Контр.							
Затверд.	Склабінський						

## Вступ

Природним газом називається суміш таких газів, які утворилися в земних надрах при розкладанні різних органічних речовин. Природний газ є одним із найважливіших корисних копалин, активно застосовуваний у промисловості і в побуті. В умовах залягання (або, як іще кажуть, в пластових умовах) природний газ знаходиться виключно в газоподібному стані або у вигляді так званої «газової шапки» в загальних родовищах нафти і газу, або у вигляді газових покладів (тобто, окремих скупчень), або в розчиненому вигляді – у воді або у нафті [1].

Природний газ, що видобувається на родовищах, не є чистим продуктом, він містить безліч домішок, які можуть негативно позначитися на роботі установок для перекачування газу і трубопроводів [1].

Домішки бувають різними. Може йтися, наприклад, про механічні частинки, що містяться в природному газі. Потрапляючи в різні механізми (скажімо, газоперекачувальні агрегати на транспортній магістралі, компресори тощо), вони радикально підвищують їх зношення. Це призводить до різкого зростання витрат та падіння економічної ефективності виробництва [2].

Однак, механічні частинки – далеко не єдина домішка, яка здатна зруйнувати технологічний процес. Не меншу небезпеку становить звичайна вода. Тому проблема осушення природного газу стоїть достатньо гостро перед сучасними інженерами [1].

Найбільшого поширення набув абсорбційний метод осушення газу із застосуванням у якості основного абсорбенту гліколей. Ключовим вузлом установки осушення є абсорбційна колона, в якій і відбувається взаємодія природного газу із гліколем. Також важливою частиною установки є вузол регенерації гліколю, від ефективної роботи якого залежить ефективність осушення газу, тобто залишковий вміст вологи в осушеному газі [3].

У даному проекті представлено розрахунок тарілчастої абсорбційної колони, яка входить до складу установки осушення природного газу. Загалом кваліфікаційну роботу виконано у відповідності до методичних вказівок [5] із представленням усіх регламентованих розділів.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 Технологічна частина

## 1.1 Опис технологічної схеми установки осушення природного газу

Технологічна схема установки осушення природного газу представлена на рис. 1.1. Система осушення газу і регенерації гліколю призначена для осушення природного газу перед його спрямуванням у газопровід високого тиску з метою запобігання процесу гідратуутворення. Працює установка наступним чином.

Після компресорної установки газліфтного видобування нафти (УКГН) при температурі 35–45°C сирий природний газ надходить у кубову (нижню) частину абсорбера *A*, який являє собою багатофункціональний апарат колонного типу. Паралельно із цим, на верхню масообмінну тарілку абсорбера, подається висококонцентрований діетиленгліколь – ДЕГ (відповідно до завдання на кваліфікаційну роботу), концентрацією не менше 98 %. ДЕГ стікає назустріч газовому потоку, створюючи на кожній контактній тарілці відповідний робочий рівень. При русі газу через шар рідини на тарілках водяна пара, що міститься у природному газі, поглинається ДЕГОм, насичуючи його. Осушений до точки роси мінус 5°C природний газ, потрапляє у сепаратор *C*, де відбувається відділення залишкових крапель ДЕГу. Після чого осушений природний газ потрапляє у проміжну ємність *E<sub>1</sub>*, звідки спрямовується у газопровід високого тиску.

Насичений конденсатом (водою) ДЕГ збирається на глухий тарілці абсорбера і відводиться у газовідокремлювач (на схемі рис. 1.1 не показаний), де при тиску 0,4 МПа відбувається розгазування ДЕГу, тобто виділення поглиненого в абсорбері газу. Відокремлений від ДЕГу газ знову потрапляє у нижню частину абсорбера *A*, а ДЕГ проходить два паралельно встановлених рекуперативних підігрівача *П<sub>1</sub>* і *П<sub>2</sub>*, де нагрівається до температури 105°C, після чого спрямовується в блок регенерації.

У блоці регенерації насичений ДЕГ подається в середню частину (на тарілку живлення) десорбера *D*, де при температурі 150–160°C і пониженому тиску відбувається випаровування основної кількості вологи із ДЕГу. Нагрівання гліколю у випарнику *И* відбувається за допомогою продуктів згоряння паливного газу.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						6
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

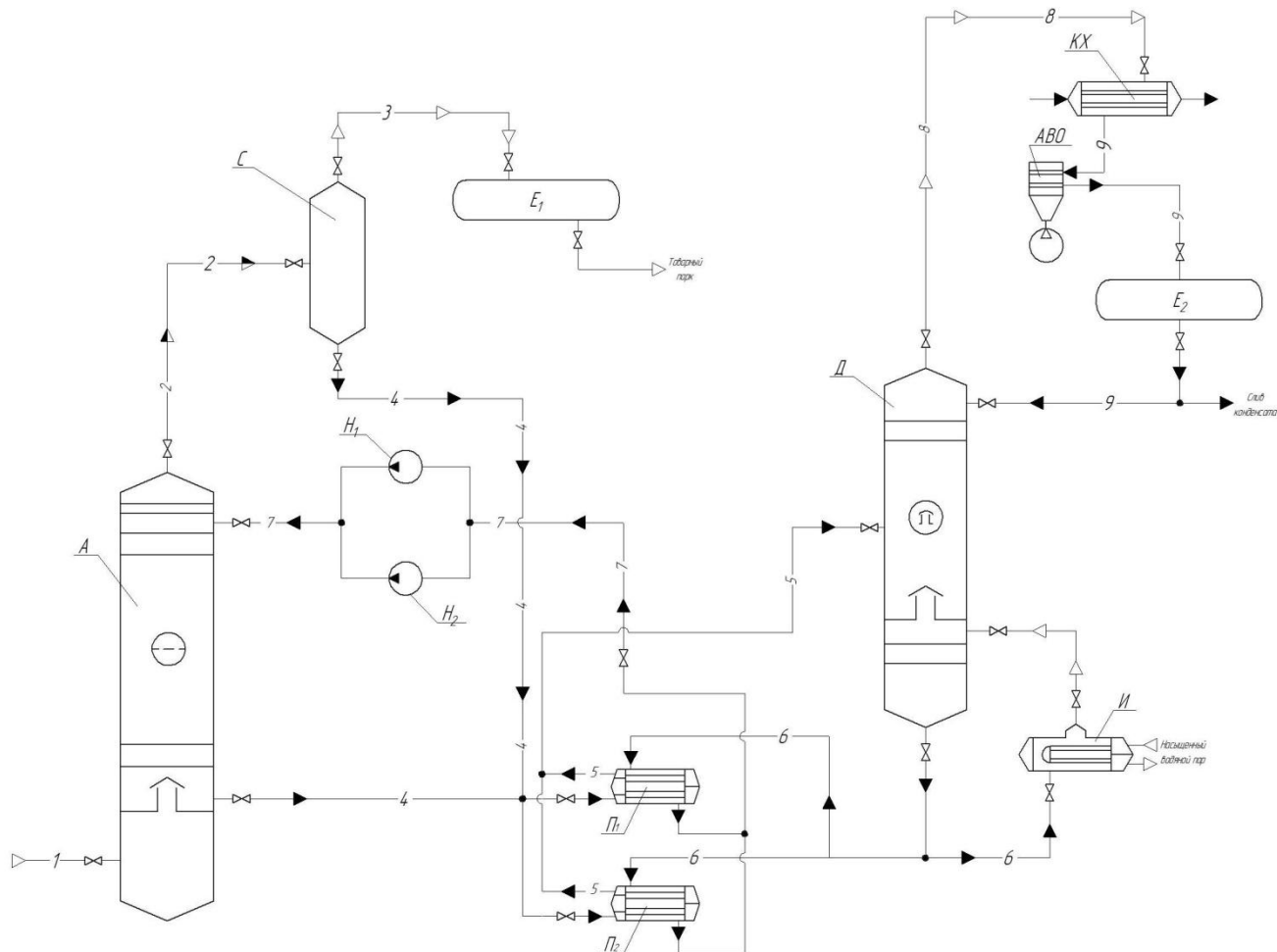


Рисунок 1.1 – Технологічна схема установки осушення природного газу

Регенований ДЕГ, проходячи по міжтрубному простору підігрівачів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ , охолоджується до температури 40–45°C за рахунок зустрічного потоку насиченого ДЕГу, подається за допомогою насосів  $H_1$  і  $H_2$  в абсорбер  $A$  для осушення природного газу.

Відокремлена водяна пара виходить через верхній штуцер десорбера  $D$  і потрапляє в конденсатор-холодильник  $KX$ , де конденсується і охолоджується. Утворений конденсат додатково охолоджується до температури 30°C у повітряному холодильнику  $ABO$ . Частина охолодженого конденсату, у вигляді зрошення, потрапляє у верхню частину десорбера  $D$ . А інша частина – може бути використана для технологічних потреб.

## 1.2 Теоретичні основи процесу абсорбції

Для абсорбційно-десорбційних процесів рівновага між газами і їх розчинами в рідині описується законом Генрі, згідно з яким парціальний тиск розчиненого газу над розчином пропорційний його мольній частці в розчині:

$$p^* = Ex$$

Значення коефіцієнта Генрі залежать від природи поглинаючого газу і поглинача, а також від температури, але не залежать від загального тиску в системі.

При відсутності експериментальних даних залежність коефіцієнта Генрі від температури розраховують за рівнянням:

$$\ln E = -\frac{q}{RT} + C$$

де  $C$  – константа, що залежить від природи газу і поглинача.

Закон Генрі застосуємо до розчинів газів, критичні температури яких вище температури розчину, і справедливий тільки для ідеальних розчинів. Тому він з достатньою точністю дотримується при малих концентраціях розчиненого газу. При великих концентраціях газів в розчині їх розчинність менше, ніж впливає із закону Генрі.

Залежність між рівноважними складами газової і рідкої фаз можна отримати на основі спільного використання законів Генрі і Дальтона:

$$y^* = \frac{Ex}{P} = tx, \text{ або } y^* = \frac{Py}{E} = \frac{y}{m}$$

При вираженні складу фаз не в абсолютних, а у відносних концентраціях видозмінюється і форма закону Генрі. Однак при малих концентраціях можна прийняти  $X \approx x$  і  $Y \approx y$ , тоді вираз рівноважної залежності набуває вигляду:

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						8
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$$Y^* = mX, \text{ або } X^* = \frac{Y}{m}.$$

На підставі отриманих даних будують графіки залежностей парціальних тисків поглинаючого компонента від температури і концентрації речовини в абсорбенті.

Коли в рівновазі з рідиною знаходиться суміш газів, закону Генрі може слідувати кожен з компонентів суміші окремо. Але зазвичай у разі абсорбції багатоконпонентних сумішей рівноважні залежності значно складніші, ніж при абсорбції одного компонента, особливо тоді, коли розчин сильно відрізняється від ідеального. При цьому парціальний тиск кожного компонента в газовій суміші залежить не тільки від його концентрації в розчині, але також і від концентрації в розчині інших компонентів, тобто є функцією великого числа змінних. Тому в подібних випадках рівноважні залежності ґрунтуються на дослідних даних.

*Основне рівняння масопередачі*, що визначає витрату речовини, що переноситься із однієї фази в іншу, виражаємо наступним чином:

$$\Delta M = K_y F (y - y^*), \text{ або } \Delta M = K_x F (x - x^*).$$

*Коефіцієнт масопередачі* показує, яка кількість речовин переходить із однієї фази в іншу за одиницю часу через одиницю поверхні контакту фаз при русій силі масопередачі, що дорівнює одиниці.

За фізичним змістом коефіцієнти масопередачі відрізняються від коефіцієнтів масовіддачі, але виражені в однакових з ними одиницях виміру. Щоб встановити зв'язок між коефіцієнтом масопередачі і коефіцієнтами масовіддачі, зазвичай вважають, що у поверхні зіткнення фаз досягається рівновага. Звідси випливає положення про аддитивність фазових опорів, яке є однією з передумов для розрахунку коефіцієнтів масопередачі:

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}}$$

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						9
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{(m\beta_y)} + \frac{1}{m\beta_x}},$$

Величини, зворотні коефіцієнтам масовіддачі, виражають дифузійні опори на кордоні розділу фаз. Доданок  $1/\beta_y$  являє собою опір масопередачі, який чиниться газовою фазою, а доданок  $m/\beta_x$  – опір рідкої фази. Аналогічно доданок  $1/(m\beta_y)$  висловлює опір газової фази, доданок  $1/\beta_x$  – рідкої фази.

*Рушійна сила абсорбції*, як і будь-якого масообмінного процесу, визначається ступенем відхилення від рівноважного стану, і чим більше це відхилення, тим інтенсивніше йде процес масопередачі. Рушійна сила виражається різницею робочої і рівноважної концентрацій  $\Delta y$  цільового компонента в газовій фазі або різницею концентрацій  $\Delta x$  у рідкій фазі.

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

Абсорбер являє собою суцільнозварний циліндричний апарат із напівсферичними кришками і циліндро-конічною опорою (рис. 1.2). Для монтажу контактних тарілок і внутрішнього огляду апарату на корпусі передбачені люки діаметром 500 мм. Для запобігання замерзання рідини у кубову частину абсорбційної колони вмонтовано зміювик, через який у холодну пору року подається гарячий теплоносій із загальностанційної системи теплопостачання. Краплевідбійники забезпечують уловлювання крапель ДЕГу.

Основним призначенням абсорбера є вилучення вологи (водяної пари) з природного газу із застосуванням рідкого поглинача – діетиленгліколю (ДЕГ).

Працює абсорбер наступним чином. Сирий газ у кількості 100 000 м<sup>3</sup>/год. під абсолютним тиском 100 ат. подається у нижню частину абсорбера, де газ очищується від крапельної рідини. Злив конденсату здійснюється періодично. Очищений газ через глуху тарілку надходить у масообмінну частину апарату, у якій містяться контактні елементи – ситчасто-клапанні тарілки.

					<b>XI.A.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>10</b>

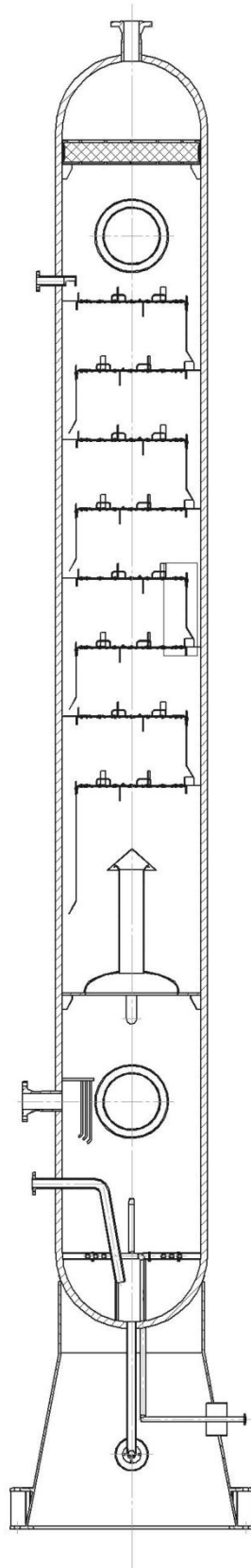


Рисунок 1.2 – Схема тарілкового абсорбера

До корпусу колони знизу приварена опорна частина циліндрично-конічного типу, у якій є один лаз і отвори для виведення дренажного трубопроводу. У верхню частину абсорбера безперервно подається регенований абсорбент (ДЕГ), що

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

стікає по тарілках назустріч газу. Контакт фаз усередині колони відбувається поступово. Механізм роботи тарілчастої колони полягає в тому, що кожна тарілка діє як самостійна ступінь контракту для зустрічних потоків газу і рідини. Контактуючи між собою, фази обмінюються речовиною і енергією внаслідок прагнення взаємодіючих фаз до стану рівноваги. Волога витягується з газу до тих пір, поки парціальний тиск води у газі і над розчином осушувача не стануть рівними, тобто водяна пара, що міститься в газі, буде поглинатися ДЕГом, аж поки не наситить його. Осушений до необхідної точки роси газ потрапляє у верхню частину абсорбера, де проходить через краплевідбійник, призначений для уловлювання крапель ДЕГу. Насичений водою ДЕГ збирається на глухій тарілці абсорбера, а потім відводиться на регенерацію.

У хімічній промисловості умови роботи апаратів характеризуються широким діапазоном температур – приблизно від мінус 254 до плюс 2500°C при тисках від 0,015 Па до 600 МПа при агресивному впливі середовищ [11].

Основними вимогами, яким повинні відповідати хімічні апарати, є механічна надійність, довговічність, конструктивна досконалість, простота виготовлення, зручність транспортування, монтажу та експлуатації [11–13].

Загалом гліколі не викликають корозію вуглецевих сталей, проте продукти їх розкладення чи окислення, а також домішки, які надходять разом із газом, можуть бути агресивними. Продукти корозії (оксиди, сульфід заліза тощо) осідають на контактних тарілках абсорбера, забивають трубки теплообмінної апаратури, погіршують теплопередачу, прискорюють подальшу корозію і викликають ерозію устаткування.

Оскільки вміст сірководню в осушуваному природному газі не значний – для виготовлення основних деталей та вузлів абсорбційної колони використовуємо сталь 09Г2С. Матеріал опори – сталь ВСтЗсп. Для усіх інших елементів – сталь Ст 3. Для ущільнення з'єднань використовуємо прокладковий матеріал – пароніт ПОН-1. Це листовий матеріал, виготовлений пресуванням азбокаучукової маси, що складається із азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

## 2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Технологічні розрахунки

У разі насичення газу водяною парою, вологовміст визначається за графіком [10], у залежності від температури і тиску в системі.

Температура контакту вологого газу (або температура, при якій подається газова суміш в абсорбер) визначається у залежності від вмісту діетиленгліколю. Із графіка [10] при  $x_1 = 0,992$  мас. частки  $t_c = 45^\circ\text{C}$ .

Точка роси вологого газу до контакту з діетиленгліколем:

$$t'_p = t_p + \Delta t, \quad (2.1)$$

де  $\Delta t = 36^\circ\text{C}$  – зниження точки роси; визначається у залежності від температури контакту [10].

$$t'_p = -5 + 36 = 31^\circ\text{C}.$$

Початковий вологовміст вуглеводневого газ при температурі  $t_c = 45^\circ\text{C}$  і тиску  $p = 10$  МПа дорівнює  $C_H = 100 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>; кінцевий – при температурі  $t_p = -5^\circ\text{C}$  і тиску  $p = 10$  МПа дорівнює  $C_K = 6 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup> [10].

Температура діетиленгліколю при введенні в апарат приймається рівною  $t_{\text{ГЛ}} = 45^\circ\text{C}$  [10].

Кількість свіжого розчину, який подається в поглинальну абсорбційну колону, розраховується за формулою [10]:

$$G_{\text{ГЛ}} = G_{\text{ВЛ.П}} \frac{x_2}{x_1 - x_2}, \quad (2.2)$$

де  $G_{\text{ВЛ.П}}$  – кількість вологи що поглинається, кг/год.;

$x_1$  і  $x_2$  – відповідно концентрації ДЕГ у свіжому і насиченому розчині, мас. частки.

Кількість поглинаючої вологи розраховується за формулою [10]:

$$G_{\text{ВЛ.П}} = (C_H - C_K)V, \quad (2.3)$$

де  $V$  – об'ємна кількість вуглеводневої сировини, м<sup>3</sup>/год.

Об'ємну кількість вуглеводневої сировини знаходимо за формулою:

$$V = \frac{22,4 \cdot G \cdot (t_c + 273) \cdot P_0 \cdot 10^6 \cdot z}{M_z \cdot T_0 \cdot P} \quad (2.4)$$

де  $G$  – кількість газу, кг/год. (див. табл. 2.1);

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

$P_0$  – атмосферний тиск, МПа;

$T_0$  – абсолютна температура, К;

$z$  – коефіцієнт стисливості газової суміші.

Таблиця 2.1 – Розрахунок складу газу

Компо- нент	Мольна маса, $M_i$	Кількість $V_i$ , нм <sup>3</sup> /ГОД.	Вміст $y'_i = \frac{V_i}{\sum V_i}$ , МОЛ. ЧАСТКИ	$M_i y'_i$	Кількість $G_i = \frac{V_i M_i}{22,4}$ , КГ/ГОД.	Вміст $y'_i = \frac{M_i y'_i}{\sum M_i y'_i}$ , МАС. ЧАСТКИ
CH <sub>4</sub>	16	76302	0,76302	12,21	54501	0,5765
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	9616	0,09616	2,88	12879	0,1360
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	5473	0,05473	2,41	10751	0,1138
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	1844	0,01844	1,07	4775	0,0505
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	530	0,0053	0,38	1704	0,0179
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	226	0,00226	0,19	868	0,0090
CO <sub>2</sub>	44	1927	0,01927	0,85	3785	0,0401
N <sub>2</sub>	28	4067	0,04067	1,14	5084	0,0538
O <sub>2</sub>	32	15	0,00015	0,05	21	0,0024
Σ	–	100000	1,00000	21,18	94368	1,0000

Для суміші газів коефіцієнт стисливості визначається у залежності від при-  
ведених температури і тиску [10]:

$$\tau_{np} = \frac{T}{T_{пс.кр}}; \quad (2.5)$$

$$P_{np} = \frac{P}{P_{пс.кр}}, \quad (2.6)$$

де  $T_{пс.кр}$  і  $P_{пс.кр}$  – псевдокритичні параметри компонентів (див. табл. 2.2).

$$\tau_{np} = \frac{318}{217} = 1,47;$$

$$P_{np} = \frac{10}{4,6} = 2,17.$$

Таблиця 2.2 – Розрахунок псевдокритичних параметрів сирого газу

Компонент	Вміст $y'_i$ , мол. частки	Критичні параметри		Псевдокритичні параметри	
		температура $T_{кр,i}$ , К	тиск $P_{кр,i}$ , МПа	температура $T_{пс.кр} = y'_i T_{кр}$ , К	тиск $P_{пс.кр} = y'_i P_{кр}$ , МПа
CH <sub>4</sub>	0,7654	190,55	4,60	145,8	3,521
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,0968	305,43	4,88	29,6	0,472
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,0538	369,82	4,25	19,9	0,228
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0172	425,16	3,80	7,3	0,065
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0045	470	3,37	2,1	0,015
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,0013	507	3,01	0,7	0,004
CO <sub>2</sub>	0,0194	304,20	7,38	5,9	0,143
N <sub>2</sub>	0,0414	126,1	3,29	5,2	0,136
O <sub>2</sub>	0,0002	154,62	5,08	0,0	0,001
Σ	1,0000	–	–	217	4,6

Коефіцієнт стисливості при  $\tau_{пр} = 1,47$  і  $P_{пр} = 2,17$  дорівнює  $z = 0,83$  [14].

$$V = \frac{22,4 \cdot 94368 \cdot (45 + 273) \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,83}{21,18 \cdot 273 \cdot 10 \cdot 10^6} = 100000 \text{ м}^3/\text{год.}$$

$$G_{вл.л} = (100 - 6) \cdot 10^{-5} \cdot 100000 = 94 \text{ кг/год.}$$

Концентрація гліколю в насиченому розчині дорівнює  $x_2 = 0,975$ ; правильність прийнятого числового значення підтверджується подальшим розрахунком.

Кількість свіжого розчину дорівнює:

$$G_{гл} = 94 \frac{0,975}{0,992 - 0,975} = 5391 \text{ кг/год.}$$

Об'ємна кількість свіжого розчину [10]:

$$V_{гл} = \frac{G_{гл}}{\rho}, \quad (2.7)$$

де  $\rho = 1105 \text{ кг/м}^3$  – густина розчину гліколю при температурі  $t_c = 45^\circ\text{C}$  [10].

$$V_{гл} = \frac{5391}{1105} = 4,9 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Кількість циркулюючого гліколю залежить, головним чином, від продуктивності установки, вмісту вологи у сирому газі і ступеня осушення. У промислових системах вона складає  $1\text{--}10 \text{ м}^3/\text{год.}$  [10].

					Лист
					15
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	XI.A.00.00.00 ПЗ

Рівняння матеріального балансу абсорбера має вигляд [10]:

$$G_y + G_{ггЛ} = G_o + G_{ггЛ.н} . \quad (2.8)$$

Його ліва частина відповідає матеріальним потокам, які вводяться в апарат (кг/год.):  $G_y$  – зі зволоженим газом;  $G_{ггЛ}$  – із розчином гліколю; права – виведеним з апарату матеріальним потоком (кг/год.):  $G_o$  – з осушеним газом;  $G_{ггЛ.н}$  – з насиченим розчином гліколю.

На рис. 2.1 приведена розрахункова схема абсорбера для осушення природного газу.

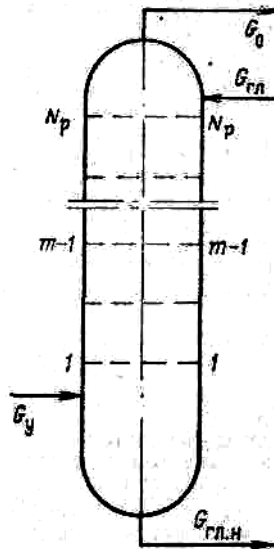


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема абсорбера для осушення газу

Кількість зволоженої газової сировини дорівнює [10]:

$$G_y = G + C_H V , \quad (2.9)$$

$$G_y = 94368 + 100 \cdot 10^{-5} \cdot 100000 = 94468 \text{ кг/год.}$$

Кількість осушеної газової сировини [10]:

$$G_o = G_y - G_{вл.п} - G_{р.у} , \quad (2.10)$$

де  $G_{р.у}$  – кількість вуглеводневих компонентів, розчинних в ДЕГу, кг/год.

Кількість вуглеводневих компонентів, що поглинаються діетиленгліколем у результаті розчинення [10]:

$$G_{р.у} = V_{р.у} \rho_{р.у} V_{ггЛ} , \quad (2.11)$$

де  $V_{р.у}$  – розчинність вуглеводневих газів в діетиленгліколі,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16



$\rho_{p,y}$  – густина газової суміші, кг/м<sup>3</sup>.

Розчинність вуглеводневих газів у діетиленгліколі при тиску  $P = 10$  МПа і прийнятій середній температурі в апараті  $t = 53^\circ\text{C}$  дорівнює  $V_{p,y} = 7,04$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Густина газової суміші дорівнює [10]:

$$\rho_{p,y} = \frac{M_r P 273}{22,4(t + 273)0,1z}, \quad (2.12)$$

Рівноважні втрати ДЕГу при його випаровуванні і унесенні з колони із осушеним газом визначаються за діаграмою [10] у залежності від температури контакту  $t_c = 45^\circ\text{C}$  і тиску в апараті  $P = 10$  МПа. Таким чином,  $\Delta g = 4,8 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>3</sup>·10<sup>3</sup>).

$$\rho_{p,y} = \frac{21,18 \cdot 10 \cdot 273}{22,4(45 + 273)0,1 \cdot 0,83} = 97,8 \text{ кг/м}^3;$$

$$G_{p,y} = 7,04 \cdot 97,8 \cdot 4,9 = 2875 \text{ кг/год.}$$

Кількість  $i$ -го вуглеводню, що розчиняється в діетиленгліколі [10]:

$$g_i = G_{p,y} x_i, \quad (2.13)$$

де  $x_i$  – масова частка  $i$ -го вуглеводню, що розчинився в діетиленгліколі.

Масова частка  $i$ -го вуглеводню, що розчинився в діетиленгліколі знаходиться із припущення при одночасному розчиненні вуглеводнів пропорційно їх коефіцієнтам дифузії в розчиннику.

Коефіцієнти дифузії вуглеводнів в ДЕГ, при середній температурі процесу  $t = 53^\circ\text{C}$ , розраховуються за наближеною формулою [10]:

$$D_i = D_{20} [1 + b(t - 20)], \quad (2.14)$$

де  $D_{20}$  – коефіцієнт дифузії вуглеводнів в ДЕГ при температурі  $20^\circ\text{C}$ , м<sup>2</sup>/с;  
 $b$  – коефіцієнт, який враховує вплив температури на дифузію речовини.

Коефіцієнт  $D_{20}$  розраховується за формулою [14]:

$$D_{20} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{AB \sqrt{\mu} (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \quad (2.15)$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти, що залежать від властивостей розчиненої речовини і розчинника (для газів  $A = 1$ ; для гліколю  $B = 2$ );

$\mu = 25$  мПа·с – динамічний коефіцієнт в'язкості [15];

$V_A, V_B$  – молярні об'єми розчиненої речовини і діетиленгліколю;

$M_A$  і  $M_B$  – молярні маси газу і діетиленгліколю.

										Лист
										17
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Молярний об'єм вуглеводнів і діетиленгліколю, які визначаються як сума атомних об'ємів елементів, що входять до складу газу і діетиленгліколю, розраховані за даними [14], результати наведені в табл. 2.3. Там же подано числові значення коефіцієнтів дифузії газів при температурі  $t = 53^\circ\text{C}$ , розраховані за формулою (2.15), і масові частки вуглеводнів, розчинених в діетиленгліколі.

Таблиця 2.3 – Розрахунок складу вуглеводнів, розчинених в ДЕГ

Компонент	Мольна маса, $M_i$	Молярний об'єм, $V_i$	Коефіцієнт дифузії $D_i \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$	$x_i = \frac{D_i}{\sum D_i}$ мас. частки
$\text{CH}_4$	16	29,6	8,19	0,3019
$\text{C}_2\text{H}_6$	30	51,8	5,39	0,1987
$\text{C}_3\text{H}_8$	44	74,8	4,20	0,1548
$\text{C}_4\text{H}_{10}$	58	96,2	3,50	0,1290
$\text{C}_5\text{H}_{12}$	72	118,4	3,08	0,1135
$\text{C}_6\text{H}_{14}$	86	140,6	2,77	0,1021
$\Sigma$	–	–	27,13	1,0000

Кількість втраченого діетиленгліколю дорівнює [10]:

$$g_{\text{ГЛ}} = \Delta g \frac{V}{1000}; \quad (2.16)$$

$$g_{\text{ГЛ}} = 4,8 \cdot 10^{-3} \frac{100000}{1000} \approx 0,48 \text{ кг/год.}$$

Кількість осушеного газу дорівнює [10]:

$$G_O = G_V - G_{\text{ВЛ.П}} - G_{\text{Р.У}} + g_{\text{ГЛ}}; \quad (2.17)$$

$$G_O = 94468 - 94 - 2875 + 0,48 = 91499,5 \text{ кг/год.}$$

Кількість насиченого розчину гліколю дорівнює [10]:

$$G_{\text{ГЛ.Н}} = G_{\text{ГЛ}} + G_{\text{ВЛ.П}} + G_{\text{Р.У}} - g_{\text{ГЛ}}; \quad (2.18)$$

$$G_{\text{ГЛ.Н}} = 5391 + 94 + 2875 - 0,48 = 8359,5 \text{ кг/год.}$$

Матеріальний баланс процесу осушення природного газу представлений у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Матеріальний баланс процесу осушення природного газу

Потік, який надходить в апарат	Кількість, кг/год.	Потік, який виводиться з апарату	Кількість, кг/год.
Зволожена парогазова суміш $G_y$	94468	Осушена газова суміш $G_o$	91499,5
Свіжий розчин гліколю $G_{гл}$	5391	Насичений розчин гліколю $G_{гл.н}$	8359,5
$\Sigma$	99859	$\Sigma$	99859

Масова частка ДЕГ в насиченому розчині становить 97,5 %.

У нашому абсорбері осушення газу повинно відбуватись при ізотермічних умовах, що майже непомітно вплине на температуру діетиленгліколю.

Рівняння теплового балансу абсорбера має вигляд [10]:

$$Q_{G_y} + Q_{G_{гл}} + Q_{G_K} + Q_{G_P} = Q_{G_o} + Q_{G_{гл.н}} \quad (2.19)$$

Ліва частина рівняння (2.19) відповідає приходу тепла (кВт):  $Q_{G_y}$  – із газовою сировиною;  $Q_{G_{гл}}$  – зі свіжим розчином ДЕГ;  $Q_K$  – від виділення тепла при конденсації водяної пари і розчинення конденсату в гліколі;  $Q_P$  – від часткового розчинення вуглеводнів у гліколі; права – витраті тепла (кВт):  $Q_{G_o}$  – з осушеним газом;  $Q_{G_{гл.н}}$  – з насиченим розчином гліколю.

Кількість тепла, що вноситься в апарат вологим газом [10]:

$$Q_{G_y} = G_y c_p t_c, \quad (2.20)$$

де  $c_p$  – теплоємність газової сировини, кДж/(кг · °С).

Теплоємність газової сировини розраховується за формулою [10]:

$$c_p = c_p^0 - \Delta c_p, \quad (2.21)$$

де  $c_p^0$  – ізобарна теплоємність газової суміші в розрахунку на ідеальний газ, кДж/(кг · °С);

$\Delta c_p$  – поправка на тиск, кДж/(кг · °С).

Теплоємність  $c_p^0$  обчислюється за формулою [10]:

$$c_p^0 = \sum y_i c_{pi}^0, \quad (2.22)$$

де  $y_i$  – вміст  $i$ -го компонента в суміші, мас. частки;

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						19
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$c_{pi}^0$  – теплоємність  $i$ -го компонента в розрахунку на ідеальний газ, кДж/(кг · °С).

Теплоємність компонентів газової сировини, як ідеальних газів, розраховується за формулою [10]:

$$c_{pi}^0 = E_i + F_i \left( \frac{T}{100} \right) + G_i \left( \frac{T}{100} \right)^2 + H_i \left( \frac{T}{100} \right)^3 + N_i \left( \frac{100}{T} \right), \quad (2.23)$$

де  $E_i, F_i, G_i, H_i, N_i$ , кДж/(кг·°С) – коефіцієнти, значення яких для ряду речовин, які часто зустрічаються в розрахунках, наведені у [10].

Розрахунок ізобарної теплоємності сировини як ідеального газу наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахунок ізобарної теплоємності газової сировини абсорбера, як ідеального газу (при  $t_c=45$  °С)

Компонент	Кількість $g_i$ , кг/год.	Вміст $y_i$ , мас. частки	Теплоємність $c_{pi}^0$ , кДж/(кг · °С)	$y_i c_{pi}^0$ , кДж/(кг · °С)
CH <sub>4</sub>	54501	0,577531	2,29	1,32
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	12879	0,136475	1,84	0,25
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	10751	0,113925	1,77	0,20
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	4775	0,050599	1,75	0,09
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1704	0,018057	1,56	0,03
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	868	0,009198	0,55	0,01
CO <sub>2</sub>	3785	0,040109	0,86	0,03
N <sub>2</sub>	5084	0,053873	1,03	0,06
O <sub>2</sub>	21	0,000222	0,92	0,00
H <sub>2</sub> O	1	0,000011	1,85	0,00
Σ	94369	1,000000	–	1,99

Поправка теплоємності на тиск в апараті розраховується за [10]:

$$\Delta c_p = \frac{R}{M} (\Delta c_p^0 + \omega \Delta c_p'), \quad (2.24)$$

де  $R = 8,315$  кДж/(кмоль · °С) – універсальна газова постійна;

$\omega$  – фактор ацентричності (безрозмірна величина);

$\Delta c_p^0, \Delta c_p'$  – функція, що враховує вплив тиску (безрозмірна величина).

										Лист
										20
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Величина  $\Delta c_p^\circ$  і  $\Delta c_p'$  визначаються за графіками [10], у залежності від  $\tau_{\text{пр}} = 1,47$  і  $P_{\text{пр}} = 2,17$ . Вони відповідно дорівнюють:  $\Delta c_p^\circ = -1,8$ ;  $\Delta c_p' = -0,53$ .

Числове значення  $\omega = 0,041$  розраховано у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Розрахунок фактора ацентричності для газової сировини абсорбера

Компонент	Мольна маса, $M_i$	Кількість		Вміст $y'_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$ , мол. частки	$\omega_i$	$y'_i \omega_i$
		$g_i$ , кг/год.	$n_i = \frac{g_i}{M_i}$ , кмоль/год.			
CH <sub>4</sub>	16	54501	3406,3	0,762992	0,013	0,0099
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	12879	429,3	0,096161	0,105	0,0101
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	10751	224,3	0,054722	0,152	0,0083
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	4775	82,3	0,018435	0,393	0,0072
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	1704	23,7	0,005309	0,458	0,0024
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	868	10,1	0,002262	0,290	0,0007
CO <sub>2</sub>	44	3785	86,0	0,019263	0,041	0,0008
N <sub>2</sub>	28	5084	181,6	0,040677	0,040	0,0016
O <sub>2</sub>	32	21	0,7	0,000157	0,0213	0,0000
H <sub>2</sub> O	18	1	0,1	0,000022	0,348	0,0000
$\Sigma$	–	94369	4464,4	1,0000	–	0,041 *

\* у даному випадку  $\omega$

Величина  $\Delta c_p$  дорівнює:

$$\Delta c_p = \frac{8,315}{21,18} (-1,8 + 0,041(-0,53)) = -0,7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Тоді

$$c_p = 1,99 - (-0,7) = 2,69 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$Q_{Gy} = 94369 \cdot 2,69 \cdot 45 = 11423367 \text{ кДж}/\text{год} = 3173 \text{ кВт}.$$

Кількість тепла, яке вноситься в апарат із розчином діетиленгліколю, становить [10]:

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$Q_{G_{ГЛ}} = G_{ГЛ} c_{ГЛ} t_{ГЛ}, \quad (2.25)$$

де  $c_{ГЛ}$  – середня масова теплоємність 99,2 %-го розчину діетиленгліколю при температурі  $t_{ГЛ} = 45^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Величину теплоємності ДЕГ знаходять за графіком [10]:  $c_{ГЛ} = 2,3 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Тоді:

$$Q_{G_{ГЛ}} = 52,2 \cdot 2,3 \cdot 45 = 5402,7 \text{кДж} / \text{год} = 1,5 \text{кВт}.$$

Кількість тепла, яке виділяється при конденсації водяної пари та розчиненні конденсату і діетиленгліколю [10]:

$$Q_K = Q' + Q'', \quad (2.26)$$

де  $Q'$  – кількість тепла, що виділяється при конденсації водяної пари, кВт;

$Q''$  – кількість тепла, що виділяється при розчиненні конденсату, кВт.

Кількість тепла, що виділяється при конденсації водяної пари [10]:

$$Q' = G_{ВЛ.П} r_{H_2O}, \quad (2.27)$$

де  $r_{H_2O} = 2391,3 \text{кДж}/\text{кг}$  – теплота конденсації водяної пари при температурі  $t_c = 45^{\circ}\text{C}$ .

$$Q' = 0,91 \cdot 2391,3 = 2176 \text{кДж} / \text{год} = 0,6 \text{кВт}.$$

Кількість тепла, що виділяється при розчиненні води в діетиленгліколі [10]:

$$Q'' = G_{ВЛ.П} r_p, \quad (2.28)$$

де  $r_p = 135,2 \text{кДж}/\text{кг}$  – теплота розчинення води в діетиленгліколі.

$$Q'' = 0,91 \cdot 135,2 = 123 \text{кДж} / \text{год} = 0,034 \text{кВт}.$$

Тоді:

$$Q_K = 0,6 + 0,034 = 0,634 \text{кВт}.$$

Кількість тепла, яке виділяється при частковому розчиненні вуглеводнів у діетиленгліколі, розраховується за формулою [10]:

$$Q_P = \sum g_i r_i, \quad (2.29)$$

де  $g_i$  – кількість  $i$ -го вуглеводню, що розчинився в діетиленгліколі,  $\text{кг}/\text{год}$ ;

$r_i$  – теплота розчинення  $i$ -го вуглеводню в діетиленгліколі,  $\text{кДж}/\text{кг}$  [10].

Розрахунок кількості тепла, яке виділяється при частковому розчиненні вуглеводнів в діетиленгліколі, представлений у табл. 2.7.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						22
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.7 – Розрахунок кількості тепла, що виділяється при розчиненні вуглеводнів в ДЕГ

Компонент	Склад розчинених вуглеводнів $x_i$ , мас. частки	Кількість розчиненого вуглеводню $g_{pi} = G_{p,y} x_i$ , кг/год.	Теплота розчинення вуглеводню $r_i$ , кДж/кг	$\frac{g_i r_i}{3600}$ , кВт
CH <sub>4</sub>	0,3019	867,9	–	–
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,1987	571,3	–	–
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,1548	445,1	–	–
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1290	370,9	–	–
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,1135	326,3	–	–
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,1021	293,5	–	–
Σ	1,0000	2875	–	–

При цьому теплота розчинення  $r_i$  вуглеводнів прийнята рівною теплоті їх пароутворення.

Кількість тепла, яке відводиться із осушеним газом [10]:

$$Q_{G_o} = G_o c_p t_o, \quad (2.30)$$

де  $c_p = 2,69$  кДж/(кг·°C) – теплоємність осушеного газу при  $t_c = 45^\circ\text{C}$ .

$$Q_{G_o} = 943337 \cdot 2,69 \cdot 45 = 11419094 \text{ кДж / год} = 3172 \text{ кВт}.$$

Тепловий баланс абсорбера представлений у табл. 2.8.

Температура насиченого абсорбенту, що виводиться з апарату, розраховується за рівнянням [10]:

$$t_H = \frac{3600 Q_{G_{Л.Н}}}{G_{Л.Н} c_n}; \quad (2.31)$$

$$t_H = \frac{3600 \cdot 3,1}{87,7 \cdot 2,3} \approx 55^\circ\text{C}.$$

Тоді середня температура в абсорбері буде дорівнювати [10]:

$$t' = \frac{t_c + t_H}{2}; \quad (2.32)$$

$$t' = \frac{45 + 55}{2} = 50^\circ\text{C}.$$

Таблиця 2.8 – Тепловий баланс абсорбера

Найменування теплового потоку	Температура, °С	Кількість тепла, кВт
<b>Прихід</b>		
Газова сировина $Q_{G_V}$	45	3173
Свіжий розчин $Q_{G_{ГЛ}}$	45	1,5
Тепло конденсації розчинення води $Q_K$	–	0,634
Тепло розчинення вуглеводнів $Q_P$	–	–
$\Sigma$	–	3264,8
<b>Витрата</b>		
Осушений газ $Q_{G_O}$	27	3172
Насичений розчин $Q_{G_{ГЛ.Н}}$	$t_H$	92,8
$\Sigma$	–	3264,8

Розбіжність із прийнятим в умовах розділення середнім значенням температури в апараті  $t = 53^\circ\text{C}$  становить прийнятну величину 5,7 %.

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Число теоретичних тарілок визначаємо графічним способом.

Координати крайніх точок [10]:

– на вході розчину і виході осушеного газу

$$x'_1 = \frac{1-x_1}{x_1} \cdot \frac{M_{ГЛ}}{M_B}; \quad (2.33)$$

$$x'_1 = \frac{1-0,992}{0,992} \cdot \frac{106,12}{18} = 0,0475 \text{ кмоль води / один кмоль ДЕГ};$$

$$y'_2 = \frac{22,4C_K}{M_B}; \quad (2.34)$$

$$y'_2 = \frac{22,4 \cdot 6 \cdot 10^{-5}}{18} = 0,000045 \text{ кмоль води / один кмоль газу.}$$

– на виході розчину і вході сирого газу

$$x'_2 = \frac{1-x_{2p}}{x_{2p}} \cdot \frac{M_{ГЛ.Н}}{M_B}; \quad (2.35)$$

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24



$$x'_2 = \frac{1-0,975}{0,975} \cdot \frac{54,35}{18} = 0,1237 \text{ кмоль води / один кмоль ДЕГ};$$

$$y'_1 = \frac{22,4C_H}{M_B}; \quad (2.36)$$

$$y'_1 = \frac{22,4 \cdot 100 \cdot 10^{-5}}{18} = 0,0012 \text{ кмоль води / один кмоль газу.}$$

Мольна маса насиченого розчину діетиленгліколю  $M_{\text{гл.н}} = 54,35$  розрахована в табл. 2.9. Розрахунок координат рівноважної лінії поданий у табл. 2.10; при цьому заданий ряд числових значень концентрації води у розчині  $x_i$  (мас. частки) і за діаграмою [10] визначені числові значення парціальних тисків води у розчині ДЕГ.

Таблиця 2.9 – Розрахунок середньої мольної маси насиченого розчину ДЕГ

Компонент	Мольна маса, $M_i$	Кількість		Вміст		$M_i x'_i$
		$g_i$ , кг/год.	$n_i = \frac{g_i}{M_i}$ , кмоль/год.	$x_i = \frac{g_i}{\sum g_i}$ , мас. частки	$x'_{ni} = \frac{n_i}{\sum n_i}$ , мол. частки	
ДЕГ	106,1	5391	50,81	0,6448	0,3304	35,06
H <sub>2</sub> O	18	94	5,22	0,0112	0,0339	0,61
CH <sub>4</sub>	16	867,9	54,24	0,1038	0,3528	5,64
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	571,3	19,04	0,0683	0,1238	3,71
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	445,1	10,12	0,0532	0,0658	2,89
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	370,9	6,39	0,0444	0,0416	2,41
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	326,3	4,53	0,0390	0,0295	2,12
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	293,5	3,41	0,0351	0,0222	1,91
$\Sigma$	–	8360	153,76	1,0000	1,0000	54,35 *

\* у даному випадку  $M_{\text{гл.н}}$

Оперативна лінія АВ, побудована за координатами А ( $x'_1, y'_2$ ) і В ( $x'_2, y'_1$ ), зображена на рис. А.1 (додаток А).

Мольна концентрація води в розчині розраховується за формулою [10]:

$$x'_i = M_{\text{срi}} \frac{x_i}{M_B}, \quad (2.37)$$

де  $M_{\text{срi}}$  – середня мольна маса розчину ДЕГ.

Таблиця 2.10 – Розрахунок координат рівноважної лінії

Концентрація води в розчині $x_i$ , мас. частки	Мольна маса розчину, $M_{срi}$	Тиск водяної пари в розчині $p_i$ , Па	Мольна концентрація води в розчині $x'_i$ , кмоль/кмоль	Рівноважна молярна концентрація водяної пари в газі $y'_i = \frac{p_i}{P}$ , кмоль/кмоль
0,01	101,2	205	0,0562	0,000021
0,02	96,7	600	0,1072	0,00006
0,03	92,5	1000	0,1542	0,0001
0,05	85,3	1800	0,2368	0,00018
0,10	71,2	3000	0,3958	0,0003

Числові значення середньої мольної маси розчинів ДЕГ розраховані за формулою [10]:

$$M_{срi} = \frac{1}{\frac{x_i}{M_B} + \frac{1-x_i}{M_{ГЛ}}} \quad (2.38)$$

і представлені в табл. 2.10.

Крива рівноваги CD зображена на рис. А.1 (додаток А).

Число теоретичних тарілок визначається шляхом побудови ступінчастої лінії від точки входу газу в апарат і виходу розчину з апарату (точка В) до точки виходу газу і входу розчину (точка А). Приймаючи із деяким запасом,  $N_T = 2$ .

Діаметр абсорбера в найбільш навантаженому перетині (під нижньою тарілкою) розраховуємо за формулою [10]:

$$D_a = \frac{\frac{1800G'_{ГЛ.Н}}{\rho_{ГЛ.Н}} + \sqrt{(K_0 C + 35) \frac{G_y}{\sqrt{\rho_{р.у}(\rho_{ГЛ.Н} - \rho_{р.у})}}}}{K_0 C + 35}, \quad (2.39)$$

де  $G'_{ГЛ.Н}$  – витрата насиченого абсорбенту, кг/с;

$\rho_{ГЛ.Н} = 1110 \text{ кг/м}^3$  – густина розчину ДЕГ при температурі  $t_n = 50^\circ\text{C}$  [10];

$K_0 = 0,35$  – коефіцієнт для ситчасто-клапанних тарілок [10];

$C = 480$  – коефіцієнт для абсорберів при відстані між тарілками  $h_T = 600 \text{ мм}$ ;

$G_y$  – витрата газової сировини, кг/год.;

$\rho_{р.у} = 97,8 \text{ кг/м}^3$  – густина газової сировини.

Витрата насиченого абсорбенту становить [10]:

$$G'_{ГЛ.Н} = \frac{G_{ГЛ.Н}}{3600}; \quad (2.40)$$

$$G'_{ГЛ.Н} = \frac{8359,5}{3600} = 2,32 \text{ кг/с.}$$

Діаметр абсорбера дорівнює:

$$D_a = \frac{\frac{1800 \cdot 2,32}{1110} + \sqrt{(0,35 \cdot 480 + 35) \frac{94468}{\sqrt{97,8(1110 - 97,8)}}}}{0,35 \cdot 480 + 35} = 1,191 \text{ м.}$$

Із нормативного ряду приймаємо стандартизований діаметр 1200 мм.

Робоча висота абсорбера (рис. 2.3) дорівнює [10]:

$$H_p = h_1 + h_2 + h_3, \quad (2.41)$$

де  $h_1$  – висота нижньої частини апарату, м;

$h_2$  – висота тарілчастої частини апарату, м;

$h_3$  – висота верхньої частини апарату, м.

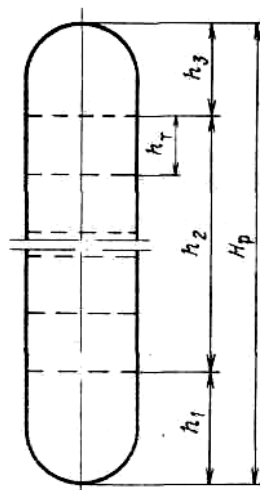


Рисунок 2.3 – Схема для розрахунку висоти тарілчастого абсорбера

Висота нижньої частини колони приймається рівною  $h_1 = 3 \text{ м}$  [10].

Висота тарілчастої частини дорівнює:

$$h_2 = (N_p - 1)h_T, \quad (2.42)$$

де  $N_p$  – число робочих тарілок в колоні.

Число робочих тарілок в апараті визначається за формулою [10]:

$$N_p = \frac{N_T}{\eta_T}, \quad (2.43)$$

де  $\eta_T$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) ситчасто-клапанних тарілок.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						27
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазвичай, ККД ситчасто-клапанних тарілок в промислових абсорберах приймають у межах 0,25–0,4 [10]. З метою максимального осушення газу приймаємо  $\eta_T = 0,25$ . Тоді:

$$N_p = \frac{2}{0,25} = 8;$$

$$h_2 = (8-1)0,6 = 4,2 \text{ м.}$$

Висота верхньої частини колони приймається рівною  $h_3 = 2 \text{ м.}$

Робоча висота абсорбера за (2.41):

$$H_p = 3 + 4,2 + 2 = 9,2 \text{ м.}$$

Для усіх потоків по входу і виходу продуктів в проектуваному абсорбері приймаємо стандартний штуцер із приварним встик фланцем і тонкостінним патрубком.

Внутрішній діаметр патрубка для введення і виведення природного газу приймаємо однаковим і визначаємо за формулою [16]:

$$d = \sqrt{4V / \pi\omega}, \quad (2.44)$$

де  $V$  – об'ємна витрата газу за робочих умов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\omega$  – рекомендована швидкість газового потоку,  $\text{м}/\text{с}$ .

Оскільки природний газ подається під тиском 10 МПа, то приймемо швидкість  $\omega$  газового потоку  $\omega = 15 \text{ м}/\text{с}$  [16].

Патрубок подачі вихідної сировини. Об'ємну витрату визначаємо за формулою:

$$V = \frac{G_y}{3600 \cdot \rho_{p,y}}; \quad (2.45)$$

$$V = \frac{94468}{3600 \cdot 97,8} = 0,268 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Діаметр штуцера:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,268}{3,14 \cdot 15}} = 0,15 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр штуцера  $D_y = 150 \text{ мм.}$

Згідно із рекомендацією [16] приймаємо швидкість руху ДЕГу в трубопроводі  $w_p = 1,5 \text{ м}/\text{с}$ .

					<i>XI.A.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28

Патрубок для введення і виведення ДЕГу. Об'ємну витрату ДЕГу визначас-  
мо за формулою:

$$V = \frac{G_{\text{дл}}}{3600 \cdot \rho_{\text{дл}}}; \quad (2.46)$$

$$V = \frac{5391}{3600 \cdot 1105} = 0,0014 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0014}{3,14 \cdot 1,5}} = 0,034 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр штуцера  $D_y = 50 \text{ мм}$ .

### 2.3 Гідравлічні розрахунки

Гідравлічний розрахунок проводимо у відповідності до методики [17].

Природний газ не містить механічних домішок. Тип тарілок – ситчасто-  
клапанні; міжтарілчаста відстань  $H = 600 \text{ мм}$ ; початкова глибина барботажу –  
приймаємо  $h_6 = 0,1 \text{ м}$ .

Діаметр отворів ситчастого полотна  $d_0 = 0,005 \text{ м}$  – приймаємо  $\xi = 1,6$ ; кое-  
фіцієнт гідравлічного опору клапана приймаємо  $\xi_K = 4,7$ .

Діапазон сталої роботи тарілки  $DIP = K_4 / K_3 = 2 / 0,8 = 2,5$ .  $DIP < 3,56$ , а от-  
же, ситчасто-клапанна тарілка задовольняє вихідним даним.

Коефіцієнт, який залежить від поверхневого натягу:

$$K_2 = 0,549 \cdot \sigma^{0,2}; \quad (2.47)$$

$$K_2 = 0,549 \cdot 48,5^{0,2} = 1,193.$$

Допоміжні комплекси:

$$A_1 = \left( \frac{\rho_x - \rho_y}{\rho_y} \right)^{0,5}; \quad (2.48)$$

$$A_1 = \left( \frac{1110 - 97,8}{97,8} \right)^{0,5} = 3,22;$$

$$A_2 = \frac{L}{G} \left( \frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,5}; \quad (2.49)$$

$$A_2 = \frac{1,5}{26,2} \left( \frac{97,8}{1110} \right)^{0,5} = 0,002.$$

						Лист
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	XI.A.00.00.00 ПЗ	

Об'ємне навантаження:

$$\text{по газу } G_V = G / \rho_y; \quad (2.50)$$

$$G_V = 26,2 / 97,8 = 0,27 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\text{по рідини } L_V = L / \rho_x; \quad (2.51)$$

$$L_V = 1,5 / 1110 = 0,00014 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Допустима швидкість газу в колоні:

$$W_\delta = 0,1 \cdot A_1; \quad (2.52)$$

$$W_\delta = 0,1 \cdot 3,22 = 0,322 \text{ м/с}.$$

Розрахунковий діаметр тарілки:

$$D = (G_V / 0,785 \omega_\delta)^{0,5}; \quad (2.53)$$

$$D = \left( \frac{0,27}{0,785 \cdot 0,322} \right)^{0,5} = 1,034 \text{ м}.$$

Приймаємо діаметр  $D = 1,2 \text{ м}$ .

Площа вільного перетину колоні:

$$S = 0,785 D^2; \quad (2.54)$$

$$S = 0,785 \cdot 1,2^2 = 1,13 \text{ м}^2.$$

Швидкість газу в колоні:

$$W = G_V / S; \quad (2.55)$$

$$W = 0,27 / 1,13 = 0,24 \text{ м/с}.$$

Фактор навантаження по газу:

$$F = \omega(\rho_y)^{0,5}; \quad (2.56)$$

$$F = 0,24(97,8)^{0,5} = 2,37 \text{ кг}^{0,5} / (\text{м}^{0,5} \cdot \text{с}).$$

За [17] вибираємо периметр зливу  $l_2 = 0,72 \text{ м}$  і відносний перетин переливу  $S_2 = 5,3 \%$ .

Відносний робочий перетин тарілки:

$$S_1 = 1 - 0,02 S_2; \quad (2.57)$$

$$S_1 = 1 - 0,02 \cdot 5,3 = 0,894.$$

Навантаження по рідині на одиницю активної площі тарілки:

$$L_{V1} = L_V / (S \cdot S_1); \quad (2.58)$$

					<i>XI.A.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		30

$$L_{v1} = 0,00014 / (1,13 \cdot 0,894) = 0,000139.$$

Коефіцієнт навантаження  $B_1 = 0,071$  [17].

Допустима швидкість газу в робочому перетині тарілки:

$$W_\delta = K_2 B_1 A_1; \quad (2.59)$$

$$W_\delta = 1,193 \cdot 0,071 \cdot 3,22 = 0,27 \text{ м/с.}$$

$$K_4 W = 1,2 \cdot 0,24 = 0,168;$$

$$W_\delta S_1 = 0,34 \cdot 0,894 = 0,304;$$

$$K_4 W = 0,168 < W_\delta S_1 = 0,304.$$

Питоме навантаження на одиницю довжини периметра зливу:

$$L_{v2} = L_v / l_2; \quad (2.60)$$

$$L_{v2} = 0,00014 / 0,72 = 0,00019 \text{ м}^2/\text{с.}$$

Оскільки  $L_{v2} < 0,0017 \text{ м}^2/\text{с}$ , то слід використовувати зубчасту зливну планку.

Підпір рідини над зливним порогом:

$$h_1 = 1,44 (L_{v2})^{2/3}; \quad (2.61)$$

$$h_1 = 1,44 (0,00019)^{2/3} = 0,01 \text{ м.}$$

Приймаємо мінімальну глибину барботажу  $h_5 = h_6 = 0,1 \text{ м}$ .

Висота газорідного шару на тарілці:

$$h_2 = h_5 \frac{1000}{\rho_x}; \quad (2.62)$$

$$h_2 = 0,1 \frac{1000}{1110} = 0,09 \text{ м.}$$

Висота зливного порогу:

$$h_7 = h_2 - h_1; \quad (2.63)$$

$$h_7 = 0,09 - 0,01 = 0,08 \text{ м.}$$

Динамічна глибина барботажу:

$$h_6 = (h_7 + h_1) \frac{\rho_x}{1000}; \quad (2.64)$$

$$h_6 = (0,08 + 0,01) \frac{1110}{1000} = 0,08 \text{ м.}$$

Коефіцієнт, що залежить від глибини барботажу:

					<b>XI.A.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						31
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_2 = 21,03 + 1,626 \ln h_6 - 1,85 \cdot 10^{-11} h_6^{-5,65} \cdot \exp(90,33 h_6); \quad (2.65)$$

$$B_2 = 21,03 + 1,626 \cdot \ln 0,08 - 1,85 \cdot 10^{-11} \cdot 0,08^{-5,65} \cdot \exp(90,33 \cdot 0,08) = 16,92.$$

Мінімально допустима швидкість газу у вільному перетині ситчастого полотна:

$$W_{0\min} = \frac{B_2 - 9(1 - 100 \cdot d_0)}{\rho_y^{0,5}}; \quad (2.66)$$

$$W_{0\min} = \frac{16,92 - 9(1 - 100 \cdot 0,005)}{97,8^{0,5}} = 1,3 \text{ м/с.}$$

Розрахунковий відносно вільний перетин ситчастого полотна:

$$f_1 = \frac{WK_3}{W_{0\min}} 100; \quad (2.67)$$

$$f_1 = \frac{0,24 \cdot 0,8}{1,3} 100 = 8,62 \text{ \%}.$$

Максимальна швидкість газу у вільному перетині клапанів:

$$W_{K\max} = 2W_{0\min} \left(\frac{\xi}{\xi_K}\right)^{0,5}; \quad (2.68)$$

$$W_{K\max} = 2 \cdot 1,3(1,6/4,7)^{0,5} = 1,52 \text{ м/с.}$$

Розрахунковий відносно вільний перетин клапанів:

$$f_2 = W(K_4 - 2K_3) 100 / W_{K\max}; \quad (2.69)$$

$$f_2 = 0,14(2 - 2 \cdot 0,85) \cdot 100 / 1,52 = 2,76 \text{ \%}.$$

Оскільки  $f_2 < 4,35$ , то приймаємо тарілку модифікації Б (виконання 2). Вибірємо  $f_6 = 7,1 \text{ \%}$  і крок між отворами  $t = 0,014 \text{ м}$  [17]. Стандартний відносний перетин клапанів становить  $f_4 = 2,5 \text{ \%}$  [17].

Максимальний фактор газового навантаження:

$$F_{K\max} = W_{K\max} (\rho_y)^{0,5}; \quad (2.70)$$

$$F_{K\max} = 1,52(97,8)^{0,5} = 14,5 \text{ кг}^{0,5} / (\text{м}^{0,5} \cdot \text{с}).$$

Питоме навантаження клапана:  $q = 256,6 \text{ Па}$ .

Коефіцієнт гідравлічного опору ситчастого полотна:

$$\xi = (d_0/t)^2 [t/(0,62d_0) - 1]^2; \quad (2.71)$$

$$\xi = (0,005/0,014)^2 [0,014/(0,62 \cdot 0,005) - 1]^2 = 1,58.$$

Коефіцієнт використання діапазону стійкої роботи ситчастого полотна:

$$B_{11} = f_1 / (K_3 f_6); \quad (2.72)$$

										Лист
										32
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	XI.A.00.00.00 ПЗ					



$$B_{11} = 8,62 / (0,85 \cdot 7,1) = 1,43.$$

Швидкість газу у вільному перетині клапанів:

$$W_K = (W - B_{11} f_6 W_{0\min}) / f_4 ; \quad (2.73)$$

$$W_K = (0,14 - 1,43 \cdot 7,1 \cdot 1,3 \cdot 0,01) / (0,01 \cdot 2,5) = 0,32 \text{ м/с.}$$

Допоміжний комплекс:

$$A_3 = \frac{2q}{W_K^2 \rho_n} - 0,82 ; \quad (2.74)$$

$$A_3 = \frac{2 \cdot 256,6}{0,32^2 \cdot 97,8} - 0,82 = 54,13.$$

Тоді:

$$B_3 = \frac{1,5}{A_3^{0,5}} ; \quad (2.75)$$

$$B_3 = \frac{1,5}{54,13^{0,5}} = 0,2.$$

Робочий відносно вільний перетин тарілки:

$$f_5 = f_6 + B_3 f_4 (\xi / \xi_K)^{0,5} ; \quad (2.76)$$

$$f_5 = 7,1 + 0,2 \cdot 2,5 (1,58 / 4,7)^{0,5} = 7,39.$$

Фактор аерації:

$$\beta = \frac{0,1}{\frac{30W}{f_5} + 4} + \frac{0,253}{h_6^{0,25}} ; \quad (2.77)$$

$$\beta = \frac{0,1}{\frac{30 \cdot 0,14}{7,39} + 4} + \frac{0,253}{0,08^{0,25}} = 0,5.$$

Гідравлічний опір тарілки:

$$\Delta P = 5000 \xi \left( \frac{F}{f_5} \right)^2 + 9810 \beta h_6 ; \quad (2.78)$$

$$\Delta P = 5000 \cdot 1,58 \left( \frac{1,34}{7,39} \right)^2 + 9810 \cdot 0,5 \cdot 0,08 = 652 \text{ Па.}$$

Тоді гідравлічний опір усієї колони складе:

$$\Delta P_K = 652 \cdot 6 = 3912 \text{ Па.}$$

Приймаємо величину гідравлічного опору абсорбера  $\Delta P_K = 5000 \text{ Па.}$

					<i>XI.A.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

Висота сепарації простору:

$$H_c = H - 2,5 \frac{h_6}{f_5}; \quad (2.79)$$

$$H_c = 0,6 - 2,5 \frac{0,08}{7,39} = 0,57 \text{ м.}$$

Швидкість рідини в переливі:

$$u = \frac{100 \cdot L_v}{SS_2}; \quad (2.80)$$

$$u = \frac{100 \cdot 0,00014}{1,13 \cdot 5,3} = 0,023 \text{ м/с.}$$

Допустима швидкість рідини в переливі:

$$u_\partial = 0,008 K_5 [H(\rho_x - \rho_y)]^{0,5}; \quad (2.81)$$

$$u_\partial = 0,008 \cdot 0,85 [0,6(1110 - 97,8)]^{0,5} = 0,168 \text{ м/с;}$$

$$u_\partial = 0,168 > u = 0,023.$$

Розрахунок закінчено.

## 2.4 Вибір допоміжного обладнання

### Вибір насосів $N_1$ і $N_2$ для подачі ДЕГу в абсорбер [18].

Розрахунок і вибір насосів проводимо за необхідними напором і витраті  $V = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . На технологічній схемі (див. рис. 1.1) подача регенованого ДЕГу у верхню частину абсорбера забезпечується двома, паралельно встановленими, насосами. У такому випадку продуктивність одного насосу становить:  $V = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Напір розраховують за формулою:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + H_r + h_n, \quad (2.82)$$

де  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  – тиск в апараті, із якого перекачується рідина;  
 $p_2 = 10 \text{ МПа}$  – тиск в абсорбері;  
 $\rho = 1110 \text{ кг/м}^3$  – густина ДЕГу;  
 $H_r = 10 \text{ м}$  – геометрична висота підйому рідини;  
 $h_n$  – сумарні втрати напором у всмоктувальній і нагнітальній лініях.

					ХІ.А.00.00.00 ПЗ	Лист
						34
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийmemo сумарні втрати напору у всмоктувальній і нагнітальній лініях рівними  $h_{\Pi} = 4$  м.

Тоді:

$$H = \frac{(10 - 0,1) \cdot 10^6}{1110 \cdot 9,81} + 10 + 4 = 923 \text{ м.}$$

Такий напір при заданій продуктивності може забезпечити насос марки ПТ-1-2,5/160.

### Ємність для дренажу [18].

При проектуванні дренажної ємності основними керівними документами є стандарти, які передбачають нормальний ряд циліндричних посудів об'ємом до  $200 \text{ м}^3$ .

Ємність для , виходячи з 6–8 годинного резерву робочого часу, а також з урахуванням коефіцієнту заповнення  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ . Приймаємо  $\psi = 0,82$ .

Розрахунковий об'єм ємності дренажної ємності:

$$V_{EP} = \frac{V \cdot \tau}{\psi}, \quad (2.83)$$

де  $V = 0,0014 \text{ м}^3/\text{с}$  – витрата ДЕГу;

$\tau = 9000 \text{ с}$  – тривалість перебування середовища в ємності;

$\varphi = 0,8$  – коефіцієнт заповнення ємності.

$$V_{EP} = \frac{0,0014 \cdot 9000}{0,8} = 15,75 \text{ м}^3.$$

Приймаємо ємність горизонтальну зі стандартизованим об'ємом  $V = 20 \text{ м}^3$ :

- діаметр  $D = 2,0$  м;
- довжина  $H = 6,4$  м.

					<i>XI.A.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

#### 3.1 Визначення товщини стінки обичайки апарата

Товщину стінки циліндричної обичайки, яка навантажена внутрішнім тиском, визначаємо за формулою [19]:

$$S_R = \frac{P_p D}{2[\sigma]\varphi_p - P_p}, \quad (3.1)$$

де  $P_p = 1,1 \cdot P = 1,1 \cdot 10 = 11$  МПа – розрахунковий тиск;

$D = 1,2$  м – внутрішній діаметр обичайки;

$\varphi_p = 0,9$  – коефіцієнт, який характеризує міцність зварного шва;

$[\sigma]$  – допустима напруга, МПа.

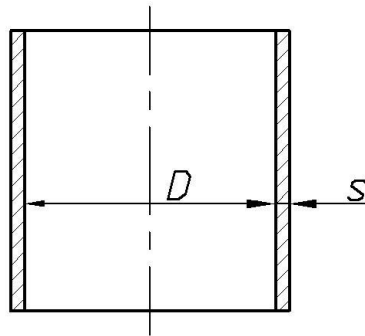


Рисунок 3.1 – Схема циліндричної обичайки

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma^*, \quad (3.2)$$

де  $\eta = 0,9$  – поправний коефіцієнт;

$\sigma^* = 191$  МПа – нормативна допустима напруга.

$$[\sigma] = 0,9 \cdot 191 = 171,5 \text{ МПа};$$

$$S_R = \frac{11 \cdot 1,2}{2 \cdot 171,5 \cdot 0,9 - 11} = 0,044 \text{ м.}$$

Виконавчу товщину стінки визначимо за формулою [19]:

$$S \geq S_K + C, \quad (3.3)$$

де  $C$  – загальне значення прибавки до розрахункових товщин, яка за формулою:

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3.4)$$

де  $C_1$  – прибавка на корозію і ерозію; при проникності  $\Pi = 0,2$  мм/рік і тер-

						XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			36

міні служби апарату  $\tau = 15$  років складе  $C_1 = \Pi \cdot \tau = 0,2 \cdot 15 = 3$  мм;

$C_2$  – прибавка на мінусове значення граничного відхилення по товщині листа, мм;

$C_3$  – технологічна прибавка, яка враховується залежність від прийнятої технології виготовлення і не включає в себе округлення розрахункової товщини елемента до номінальної товщини за стандартом, мм.

Прибавки  $C_2$  і  $C_3$  враховуються лише в тому випадку, коли їх сумарне значення перевищує 5 % від розрахункової товщини обичайки.

$$C = 3 + 0 + 0 = 3 \text{ мм};$$

$$S = 0,044 + 0,003 = 0,047 \text{ м}.$$

Приймаємо товщину циліндричної обичайки  $S = 50$  мм.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск визначається за формулою [19]:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s-c)}{D+(s-c)}, \quad (3.5)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 171,5 \cdot 0,9(0,05 - 0,003)}{1,2 + (0,05 - 0,003)} = 12 \text{ МПа}.$$

Умова міцності має вигляд:

$$P < [p];$$

$$11 \text{ МПа} < 12 \text{ МПа}.$$

Умова міцності виконується.

### 3.2 Визначення товщини стінки кришки і днища апарата

Номінальну товщину стінки напівсферичних днища і кришки, навантажених внутрішнім надлишковим тиском, визначимо за формулою [19]:

$$S_R = \frac{P_p R}{2\varphi[\sigma] - 0,5P_p}, \quad (3.6)$$

де  $R$  – радіус кривизни у вершині днища; для напівсферичних днищ  $R = 0,5D$ .

$$R = 0,5 \cdot 1,2 = 0,6 \text{ м};$$

$$S_R = \frac{11 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,9 \cdot 171,5 - 0,5 \cdot 11} = 0,022 \text{ м}.$$

Загальне значення прибавки до товщини стінки кришки та днища складе:

$$C = 3 + 0 + 7,5 = 10,5 \text{ мм};$$

						<b>XI.A.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			<b>37</b>

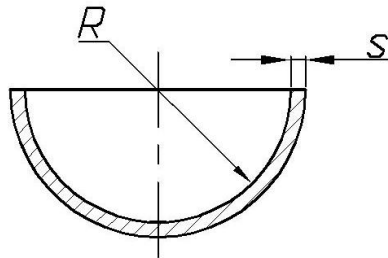


Рисунок 3.2 – Схема напівсферичного днища

$$S = 0,022 + 0,0105 = 0,0325 \text{ м.}$$

З метою надання апарату більшої міцності (до днища приварюється опора) приймаємо  $S = 50 \text{ мм}$ .

Допустимий внутрішній надлишковий тиск визначимо за формулою [19]:

$$[p] = \frac{2(S - C)\varphi[\sigma]}{R + 0,5(S - C)}; \quad (3.7)$$

$$[p] = \frac{2(0,05 - 0,01) \cdot 0,9 \cdot 171,5}{0,6 + 0,5(0,05 - 0,01)} = 16,5 \text{ МПа,}$$

що більше робочого. Отже, умова міцності виконується.

### 3.3 Розрахунок опори апарата

Визначимо навантаження порожнього апарату на опору за формулою:

$$Q_{an} = M_{an} \cdot g, \quad (3.8)$$

де  $M_{an}$  – маса порожнього апарату, кг;

$$M_{an} = M_{\kappa} + M_{\text{дн}} + M_{\text{кр}} + M_m + M_{\text{фл}}, \quad (3.9)$$

де  $M_{\kappa}, M_{\text{дн}}, M_{\text{кр}}, M_m, M_{\text{фл}}$  – відповідно маси корпусу, днища, кришки, тарілок, фланців і арматури, кг;

$$M_{\kappa} = H \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \rho, \quad (3.10)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу корпусу;  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ ;

$$M_{\kappa} = 11,44 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 0,060 \cdot 7850 = 20303.$$

$$M_{\text{дн}} = M_{\text{кр}} = F \cdot s \cdot \rho, \quad (3.11)$$

де  $F = 1,21 \text{ м}^2$  – площа внутрішньої поверхні напівсферичного днища;

$$M_{\text{дн}} = M_{\text{кр}} = 1,21 \cdot 0,060 \cdot 7850 = 570 \text{ кг.}$$

						<i>XI.A.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
							38
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Маса тарілок:

$$M_m = N \cdot m_m, \quad (3.12)$$

де  $m_m = 44$  кг – маса однієї ситчасто-клапанної тарілки.

$$M_m = 8 \cdot 44 = 352 \text{ кг.}$$

Загальну масу фланців і арматури приймемо рівною  $M_{\text{фл}} = 1000$  кг.

Тоді маса порожнього апарату складе:

$$M_{\text{ан}} = 20303 + 2 \cdot 570 + 352 + 1000 = 22795 \text{ кг.}$$

$$Q_{\text{ан}} = 22795 \cdot 9,81 = 223619 \text{ Н.}$$

Визначимо навантаження апарату на опори під час гідравлічних випробувань за формулою:

$$Q_{\text{ан}}^u = (M_{\text{ан}} + M_{\text{в}}) \cdot g, \quad (3.13)$$

де  $M_{\text{в}}$  – маса залитої води.

$$M_{\text{в}} = V \cdot \rho_{\text{в}}, \quad (3.14)$$

де  $\rho_{\text{в}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – густина води;

$V$  – об'єм апарату.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H; \quad (3.15)$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 9,2 = 10,4 \text{ м}^3;$$

$$M_{\text{в}} = 10,4 \cdot 1000 = 10400 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{ан}}^u = (22795 + 10400) \cdot 9,81 = 233821 \text{ Н.}$$

Виходячи з  $Q_{\text{max}} = Q_{\text{ан}}^u$  і  $Q_{\text{min}} = Q_{\text{ан}}$  за [19] вибираємо опору 4-1200-400-200-2100 ОСТ 26-467-78.

					ХІ.А.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39

## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж апарата [20, 21]

При монтажі повністю зібраного апарата спочатку апарат збирається із блоків, а потім приварюється опора. Частина апарата, що стикуються, підтягують один до одного трубоукладачами або тракторами. Для збігу стиків по всьому периметру до кромки однією зі стикуючих частин приварюють вісім і більше напрямних планок, які після прихватки стику обрізають.

Стиковку роблять за заводськими контрольними рисками, нанесеними на корпусах. Відхилення розмірів ділянок, що стикуються, повинні бути в межах допустимих норм: зміщення кромки в кільцевих швах не повинно перевищувати 10 % товщини листа апарата, а у разі двошарової сталі повинно бути не більше товщини шару.

У зварюваних стиках ретельно контролюють зазори, які повинні бути в межах 2–4 мм незалежно від товщини листів обичайок. Кромки зварювальних частин ретельно очищають металевими щітками. Прихватку, як і повне зварювання, виконують електродами, передбаченими проектом. Стики, що виконані з двошарової сталі, прихоплюють на основному шарі. Технологія зварювання (спосіб і режим зварювання, порядок накладення швів і термооброблення) наводиться в проектній документації заводу-виготовлювача.

Ділянка території, де проводиться зварювання, повинна бути захищена від атмосферних опадів та вітру для запобігання забруднення шва. Бажано зварювання виконувати на роликовому стенді, на рамі якого встановлюють один або два зварювальних автомати. Для зварювання внутрішнього шва один автомат розміщують всередині апарату. Після завершення зварювання остаточно перевіряють всі розміри зібраного апарату, які повинні бути в межах допусків. Корпуси відповідальних колонних апаратів повинні відповідати таким вимогам: відхилення довжини не повинно перевищувати 0,3 % від проектного; кривизна циліндра на ділянці 1 м повинна бути не більше 2 мм, а для апаратів вище 10 м – не більше 3 мм.

Тарілка – контактний пристрій в колонній апаратурі, поверхня контакту фаз в яких утворюється в процесі руху взаємодіючих потоків по поверхні тарілки.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		40



Спосіб монтажу ректифікаційних тарілок залежить від їх конструкції і технологічного призначення. Їх можна збирати при вертикальному (робочому) і горизонтальному положенні колони. Другий спосіб дозволяє скоротити загальну тривалість монтажних робіт, але пов'язаний із застосуванням пристосувань великої вантажопідйомності для підйому апарата (рис. 4.1).

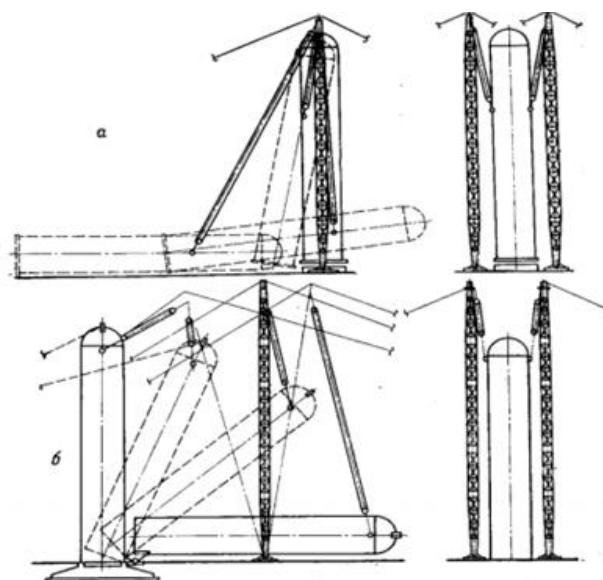


Рисунок 4.1 – Способи підйому колонного апарата:

а – способом ковзання опорної частини; б – поворотом навколо шарніра

При горизонтальному положенні апарата тарілки встановлюють строго вертикально; їх положення перевіряють по схилу, що накладають на декількох точках, і по заздалегідь нанесеним на внутрішніх стінках апарату міткам, для чого апарат доводиться повертати навколо осі на  $90^\circ$ .

Значно легше забезпечити строго горизонтальне положення тарілок в уже установленому, вивіреному і закріпленому на фундаменті корпусі апарата. У цьому випадку достатньої точності добиваються або за допомогою рівня, або заливаючи на поверхню тарілки воду.

Збірку тарілок починають з приварки до внутрішньої стінки корпусу колони опорних (несучих) елементів і нероз'ємних деталей (карманів, зливів, дисків, глухих сегментів). Зварювання проводять у відповідності до технічних умов, і з огляду на те, що при роботі колони важко визначити окремі дефекти зварювання. Після складання всіх елементів кожна тарілка перевіряється на барботаж. Для цього

закриваються всі люки, розташовані нижче контрольованої тарілки, тарілка заливається водою, щоб надмірна кількість води зливалася через зливні пристрої. Злив по всьому периметру повинен бути однаковим, тому передбачається можливість його регулювання. Товщина шару води на всіх ділянках тарілки повинна бути такою ж однаковою. Після заповнення гідро затворів за допомогою компресора нагнітається повітря. Рівномірність барботажа контролюється візуально.

## 4.2 Ремонт апарата [20, 21]

Перед початком ремонту працівники технологічного цеху (оператори) виконують підготовчі роботи. Потім до роботи приступає ремонтний персонал виконавця ремонтних робіт (слюсарі-ремонтники). Як правило, при ремонті колонних апаратів із внутрішніми пристроями тарілчастого типу передбачаються наступні роботи:

– приймання колони в ремонт за актом представником ремонтної організації (майстром ремонтно-механічної бригади);

– перед тим, як безпосередньо приступити до ремонту, необхідно отримати інструктаж з охорони праці, техніки безпеки, газобезпеки, пожежної безпеки і оформити наряд допуску на проведення газонебезпечних робіт всередині колонного апарата;

– керівник ремонтного підрозділу (майстер РМЦ) повинен ознайомитися з результатами підготовчих робіт до ремонту колони або в цілому установки, зазначених в наряді допуску;

– отримати дозвіл особи, відповідальної за організацію безпечного проведення газонебезпечних робіт в цеху (начальника або заступника начальника цеху) і приступити до виконання ремонтних робіт;

– відкриття люків-лазів проводять, починаючи із верхнього, а далі послідовно зверху вниз. Забороняється одночасно відкривати верхній і нижній люки-лази, щоб уникнути підсосу повітря в колону і займання пароповітряної суміші;

– працівниками технологічного цеху проводиться відбір проб повітря з усіх люків колони. Результати аналізів на вміст вибухонебезпечних і вибухопожежо-небезпечних речовин, і на вміст кисню записуються в наряді допуску;

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						42
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

– перед початком ремонту перевіряють температуру повітряного середовища всередині колони, яка не повинна перевищувати 30°C. Під час очистки і розбирання тарілок в колоні працює по двоє людей в кожному люку: один всередині колони у шланговому протигазі з рятувальним поясом і сигнально рятувальною мотузкою; другий спостерігаючий дублер: зовні, поруч із люком, зі шланговим протигазом.

Очищення стінок міжтарілкового простору, опорних конструкцій тарілок, зливних карманів і стінок кубової частини колони роблять за допомогою металевих скребків і щіток, а також за допомогою механізованих пристосувань і інструментів. Відкладення і бруд видаляють з колони дерев'яними лопатами через люк-лаз і спускають їх в цеберку зі спеціальними жолобами.

Тарілки розбирають в кожному люку послідовно, починаючи з верхньої. Повне розбирання усіх тарілок роблять по секціях (сегментам). Спуск секцій тарілок проводиться за допомогою кран-укосини.

Чистку тарілок проводять на зовнішньому майданчику в захисних окулярах за допомогою металевих скребків і щіток.

Одночасно проводять продування секцій паром і відбраковування дефектних деталей тарілок шляхом легкого обстукування молотком вагою від 0,5 до 1 кг.

Після очищення проводять заміну частини ковпачків. Деталі ковпачків виготовляються заново і збираються. Найбільш відповідальною операцією є приварка шпильки до корпусу ковпачка, оскільки якщо ці деталі не будуть на одній осі – правильне встановлення ковпачка є неможливим. Співвісність деталей забезпечується спеціальною оправкою, яка дозволяє також змінювати висоту шпильки шляхом її часткового розгинання при затягуванні гайки.

При ремонті корпусу колони керуються стандартами, відповідно до яких розробляється технологія усунення дефектів корпусу і його покриття. Ремонт опорних конструкцій тарілок, зливних карманів вогневими методами із використанням ручного дугового електрозварювання (РДЕЗ) і газозварювання проводять після оформлення дозволу на проведення вогневих робіт усередині апарата, дозволу на проведення газонебезпечних робіт і наряду-допуску на проведення робіт підвищеної небезпеки на кожен робочу зону, при позитивних аналізах повітряного середовища всередині колони.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						43
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш зношені ділянки корпусу колони вирізають, а на їх місце встановлюються нову ділянку, заздалегідь звальцьовану по радіусу колони. Тип зварювання – встик. Вирізання великих ділянок корпусу може призвести до ослаблення перетину і порушення стійкості. Тому до вирізання дефектної ділянки її зміцнюють стійками, що встановлюються всередині або зовні. Число та перетин стійок, розміри опорних лап розраховують, виходячи з умови рівності їх опорів опору вирізаного перетину. За допомогою таких стійок можна замінити весь пошкоджений пояс колони декількома частинами.

Зборку тарілок проводять аналогічно розбиранню, у зворотному порядку, знизу-вгору. При складанні тарілок контролюють горизонтальність установки тарілок за шаблоном або за допомогою лінійки і рівня. Відхилення від горизонтальності має бути в допустимих межах, визначених індивідуально для кожного типу тарілок.

					<i>XI.A.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		44

## 5 Охорона праці

### Сутність та будова занулення, сфера застосування та вимоги до нього.

Захисне занулення – система, в якій струмопровідні частини обладнання, ої не перебувають в нормі під напругою, з'єднані з нейтраллю. У захисних цілях на-вмисно створюється з'єднання між відкритими провідними елементами глухоза-земленою нейтраллю (в мережах трифазного струму) [22].

У мережах однофазного струму створюють контакт із глухозаземленим ви-водом джерела однофазного струму, а у випадку з постійним струмом – із глухо-заземленою точкою джерела струму. Хоча занулення характеризується серйозни-ми недоліками, система як і раніше широко застосовується в багатьох сферах для захисту від струму [22].

Занулення, що застосовується в електромережах, підрозділяється на робоче і захисне. Якщо робоче занулення виконане за допомогою робочого провідника N і має електричний зв'язок з такими елементами електромережі, як глухозаземле-ною нейтраллю генератора або трансформатора (трифазна мережа), із глухозазем-леним виводом джерела (однофазна мережа постійного струму), із глухозаземле-ною точкою джерела (однофазна мережа постійного струму), то захисне занулен-ня виконано за допомогою захисного провідника PE і має електричний зв'язок із цими ж елементами електричної мережі, що і робоче занулення. Робоче занулення призначене для забезпечення процесу електропостачання, а захисне виконує фун-кції електробезпеки або «захисного заземлення». У різних випадках для захисту від дії електричного струму може застосовуватися або захисне занулення або за-хисне заземлення. Так, наприклад, останнім застосовується для захисту від дії електричного струму у разі непрямого дотику. Далі ми детально розглянемо, що таке занулення, для чого воно потрібно і як працює [23].

Робота захисного занулення і захисного заземлення відрізняються тим, що при зануленні, якщо на корпусі обладнання з'являється небезпечний потенціал, то може статися коротке замикання. Під дією струму короткого замикання в кілька разів більшого за значенням, ніж номінальний струм мережі, спрацьовує запобіж-ник або інший захисний апарат. При захисному заземленні нищівну силу елект-

ричного струму нейтралізується зниженням величини напруги дотику (і напруги кроку) до безпечного значення. Пошкоджений побутовий електроприлад або електрообладнання, що не мають захисних занулення або заземлення, можуть довгий час перебувати під напругою і стати небезпечними для людини в момент торкання або при наближенні до обладнання на небезпечну відстань.

Як сказано вище, при попаданні фази на корпус приладу, який виконаний з металу і з'єднаний з нульовим захисним провідником, відбувається коротке замикання. Величина струму короткого замикання більше в кілька разів величини номінального струму. Під його впливом спрацьовують апарати захисту. Внаслідок цього відключаються електричні лінії, підключені через захисний апарат.

Площу перерізу провідників слід вибирати, виходячи з вимог відповідних глав ПУЕ. Для захисних провідників визначено залежність їх перетину від перерізу фазних провідників. Так для площ перетинів провідників фази, менших  $16 \text{ мм}^2$ , розмір площі перетину захисного провідника дорівнює площі перетину захисного провідника. Якщо площа перерізу фазного провідника знаходиться в діапазоні від  $16$  до  $35 \text{ мм}^2$ , то площа перерізу захисного провідника дорівнює  $16 \text{ мм}^2$  і якщо площа перерізу фазного провідника більше  $35 \text{ мм}^2$ , то площа захисного провідника вибирається в 2 рази менше. Також площа перетину можна розрахувати самостійно [23].

Захисне занулення застосовується в трифазних мережах змінного струму і однофазних мережах змінного і постійного струму, рівень напруги яких до  $1000 \text{ В}$ . Якщо електрична мережа трифазна змінного струму і рівень напруги складає  $660/380 \text{ В}$ ,  $380/220 \text{ В}$  або  $220/127 \text{ В}$ , то заземлюється нульовий провідник – мережа типу TN [22].

Якщо мережа однофазна змінного струму, то захисне занулення застосовується за умови, що заземлений вивід мережі. Якщо мережа однофазна постійного струму, то захисне заземлення використовується, якщо заземлена середня точка джерела електричної енергії [22].

Захисне занулення може виконуватися як за допомогою РЕ провідників, так і за допомогою поєднаного PEN провідника. Застосування того чи іншого виду захисного занулення залежить від того, яка система заземлення використовується

в електроустановці і якої величини площа перетину живильних кабелів [22].

Також може об'єднуватися функціонал нульового захисного і нульового робочого провідників за умови, що вони використовуються в багатофазних ланцюгах в системі TN і прокладені стаціонарно. При цьому необхідно дотримуватись вимог щодо забезпечення площі поперечного перерізу жил провідників, виготовлених з різних матеріалів. Жили мідних кабелів повинні мати площу поперечного перерізу не менше 10 мм<sup>2</sup>, жили алюмінієвих кабелів – не менше 16 мм<sup>2</sup> [23].

Забороняється в колах однофазного і постійного струму поєднувати функціонал нульового захисного і нульового робочого провідників. Для захисного занулення використовується окремий третій провідник – винятком є відгалуження від ПЛ напругою до 1 кВ до однофазних споживачів електроенергії [23].

Іноді вважають, що заземлення на окремий контур, не пов'язаний з нульовим проводом мережі, краще, тому що при цьому немає опору довгого PEN-провідника від електроустановки споживача до заземлювача КТП (комплектної трансформаторної підстанції). Така думка є помилковою, тому що опір заземлення, особливо кустарного, набагато більший опору навіть довгого дроту. І при замиканні фази на заземлений таким чином корпус електроприладу струм замикання через великий опір місцевого заземлення може виявитися недостатнім для спрацьовування АВ (автоматичного вимикача) або запобіжника, що захищає цю лінію. У такому випадку корпус приладу буде перебувати під небезпечним потенціалом. Крім того, навіть якщо застосувати АВ невеликого номіналу, що спрацьовує від струму замикання на землю, все одно забезпечити необхідну ПУЕ час автоматичного відключення пошкодженої лінії практично неможливо [24].

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
						47
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список використаних джерел

1. Катц Д. Л. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа / Д. Л. Катц. – Москва : Недра, 1965. – 676 с.
2. Берлин М. А. Переработка нефтяных и природных газов / М. А. Берлин, В. Г. Гореченков, Н. П. Волков. – Москва : Химия, 1981. – 472 с.
3. Кэмпбелл Д. М. Очистка и переработка природного газа / Д. М. Кэмпбелл. – Москва : Недра, 1977. – 349 с.
4. Бекиров Т. М. Промысловая и заводская обработка природных и нефтяных газов / Т. М. Бекиров. – Москва : Недра, 1980. – 293 с.
5. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.
6. Рябцев Н. И. Природные и искусственные газы / Н. И. Рябцев. – Москва : Изд-во литературы по строительству, 1967. – 326 с.
7. Смирнов А. С. Сбор и подготовка нефтяного газа на промысле / А. С. Смирнов. – Москва : Недра, 1971. – 254 с.
8. Бараз В. И. Добыча нефтяного газа / В. И. Бараз. – Москва : Недра, 1983 – 204 с.
9. Иванова М. М. Нефтепромысловая геология и геологические основы разработки месторождений нефти и газа / М. М. Иванова, Л. Ф. Деметьев, И. П. Чоловский. – Москва : Наука, 1985. – 422 с.
10. Кузнецов А.А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности / А.А. Кузнецов, С.М. Кагерманов, Е.Н. Судаков. – Л. : Химия, 1974 – 344 с.
11. Лащинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
12. Лащинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лащинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
13. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		48



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

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

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

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

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

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

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

21. Ермаков В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шейн. – Л. : Химия, 1981. – 368 с.

22. Заземление и зануление. Назначение, область применения и устройство [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfile.net/preview/5639066/page:45/>

23. Что такое зануление и для чего оно нужно [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://samelectrik.ru/chto-takoe-zanulenie.html>

24. Занулення [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BD%D1%83%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5>

					XI.A.00.00.00 ПЗ	Лист 49
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		