

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та автоматизації
Кафедра екології та технології рослинних полімерів**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Віта ГАЛИШ

« ____ » _____

**Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Екологічна безпека»
спеціальності 101 «Екологія»
на тему: «Розробка технології утилізації нітрозних газів
виробництва каталізаторів»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ЛЕ-21

Гудзенко Катерина Володимирівна

Керівник:

д.т.н., проф.

Іваненко Олена Іванівна

Консультант з розділу «охорона праці»:

Доцент, к.т.н., доцент

Ковтун І.М.

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 р.

					ДП	Арк
						1
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП 2104. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	68	
3	A1	ДП 2104. 01.000 ТК	План поверху	1	
4	A1	ДП 2104. 02.000 ТК	Поздовжній переріз	1	
5	A1	ДП 2104. 03.000 ТК	Поперечний переріз	1	
6	A1	ДП 2104. 04.000 ТК	Технологічна схема	1	
7	A1	ДП 2104. 05.000 ТК	Скрубер Вентурі	1	

				ДП 2104.00.000		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Гудзенко К.В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Іваненко О.І.				1	1
Консульт.					КП ім. Ігоря Сікорського Каф. Е та ТРП Гр. ЛЕ-21	
Н/контр.						
Зав.каф.						

					ДП	Арк
						2
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет автоматизації, промислової інженерії та автоматизації
Кафедра екології та технології рослинних полімерів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 101 «Екологія»

Освітньо-професійна програма «Екологічна безпека»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віта ГАЛИШ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студентки

Гудзенко Катерини Володимирівни

1. Тема проєкту «Розробка технології утилізації нітрозних газів виробництва каталізаторів», керівник проєкту Іваненко Олена Іванівна, д.т.н, проф. затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту _____

3. Вихідні дані до проєкту: продуктивність виробництва – 100 кг каталізатора за 4 години, швидкість потоку газу - 338 м³/год, концентрація діоксиду азоту – 261700 мг/м³, концентрація оксиду азоту – 30100 мг/м³.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ, літературний огляд, методи утилізації нітрозних газів, розробка та опис технологічної схеми, технологічні та конструктивні розрахунки основного обладнання, будівельна частина, охорона праці, висновки, список використаних джерел та додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): технологічна схема, блок схема мат балансу, план поверху, поздовжній переріз, поперечний переріз, скрубери вентурі, схема виробництва каталізатора.

					ДП	Арк
						3
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

6. Консультант розділу проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун А.І., ст. викладач, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Отримання завдання		
	Написання теоретичної частини		
	Опрацювання технологічної схеми		
	Розрахунок технологічної частини		
	Креслення графічної частини		
	Оформлення пояснювальної записки		

Студентка

Катерина, ГУДЗЕНКО

Керівник

Олена, ІВАНЕНКО

					ДП	Арк
						4
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Розробка технології утилізації нітрозних
газів виробництва каталізаторів»**

Київ – 2026 року

					ДП	Арк
						5
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт на тему «Розробка установки утилізації нітрозних газів, що утворюються під час виробництва гетерогенних каталізаторів». Загальний обсяг роботи становить 70 сторінок, містить 2 таблиць, 10 рисунків, 5 додатки, 5 креслень формату А1 та 21 використане джерело.

Метою дипломного проєкту є розроблення технологічної схеми очищення та утилізації нітрозних газів, що утворюються під час виробництва 100 кг гетерогенного каталізатора, з одержанням розведеної азотної кислоти як корисного побічного продукту.

Пояснювальна записка містить такі розділи: вступ, літературний огляд, методи утилізації нітрозних газів, розробка та опис технологічної схеми, технологічні та конструктивні розрахунки основного обладнання, будівельна частина, охорона праці, висновки та список використаних джерел.

Графічна частина складається з технологічної схеми, плану поверху, поперечного перерізу, поздовжнього перерізу, та креслення скрубера Вентурі

ГАЗООЧИСКА, АБСОРБЕР, НІТРОЗНІ ГАЗИ, КАТАЛІЗАТОРИ,
АЗОТНА КИСЛОТА, ОКСИДИ АЗОТУ,

					ДП	Арк
						6
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ANOTATION

This diploma project is titled “Development of a System for the Utilization of Nitrous Gases Formed During the Production of Heterogeneous Catalysts.” The total length of the work is 70 pages, including 2 tables, 10 figures, 5 appendices, 5 A1-format drawings, and 21 references.

The objective of the thesis project is to develop a process flow diagram for the purification and utilization of nitrous gases generated during the production of 100 kg of a heterogeneous catalyst, with the production of diluted nitric acid as a useful byproduct.

The explanatory note contains the following sections: introduction, literature review, methods for the utilization of nitrous gases, development and description of the process flow diagram, process and design calculations for the main equipment, construction section, occupational safety, conclusions, and a list of references.

The graphical section consists of a process flow diagram, floor plan, cross-section, longitudinal section, and a drawing of the Venturi scrubber

GAS CLEANING, ABSORBER, NITROUS GASES, CATALYSTS,
NITRIC ACID, NITROGEN OXIDES,

					ДП	Арк
						7
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ЗМІСТ

<i>ВСТУП</i>	<i>10</i>
<i>1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД</i>	<i>11</i>
<i>1.1 Значення каталізаторів у промисловості</i>	<i>11</i>
<i>1.1.1 Значення та сфери використання каталізаторів</i>	<i>11</i>
<i>1.1.2 Класифікація промислових каталізаторів</i>	<i>12</i>
<i>1.2 Особливості виробництва каталізаторів із використанням нітратів</i>	<i>15</i>
<i>1.3 Технологічний процес одержання каталізатора</i>	<i>17</i>
<i>1.4 Токсичність і екологічний вплив NOx</i>	<i>19</i>
<i>2. МЕТОДИ УТИЛІЗАЦІЇ НІТРОЗНИХ ГАЗІВ</i>	<i>21</i>
<i>2.1 Загальна характеристика методів очищення NOx</i>	<i>21</i>
<i>2.2 Абсорбційні та адсорбційні методи утилізації</i>	<i>22</i>
<i>2.3 Каталітичні методи очистки газів від NOx</i>	<i>23</i>
<i>2.4 Одержання азотної кислоти</i>	<i>24</i>
<i>3. РОЗРОБКА ТА ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ</i>	<i>27</i>
<i>3.1 Обґрунтування вибраної технологічної схеми</i>	<i>27</i>
<i>3.3 Опис основного обладнання</i>	<i>30</i>
<i>3.3.1 Холодильник</i>	<i>30</i>
<i>3.3.2 Газгольдер</i>	<i>32</i>
<i>3.3.3 Доокиснювач</i>	<i>34</i>
<i>3.3.4 Електрофільтр</i>	<i>36</i>
<i>4. РОЗРАХУНКИ</i>	<i>38</i>
<i>4.1 Характеристика вихідних газів</i>	<i>38</i>

					ДП	Арк
						8
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

4.2 Матеріальний баланс	40
4.3 Теплообмінники	42
4.4 Абсорбери	44
4.5 Мокрий електрофільтр	50
5. БУДІВЕЛЬНА ЧАСТИНА.....	51
5.1 Об'ємно - планувальне вирішення будівлі.....	51
5.2 Конструктивне вирішення будівлі.....	53
5.3 Розміщення споруд на плані	55
6. ОХОРОНА ПРАЦІ	58
6.1 Повітря робочої зони	58
6.2 Електробезпека	60
6.3 Пожежна безпека	61
6.4 Виробничий шум та вібрація.....	63
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
ДОДАТОК А	68
ДОДАТОК Б.....	69
ДОДАТОК В	70
ДОДАТОК Г.....	71
ДОДАТОК Д	72

ВСТУП

Сучасна хімічна промисловість широко використовує гетерогенні каталізатори, які забезпечують підвищення ефективності технологічних процесів та зниження енерговитрат. Одним із способів їх одержання є термічний розклад нітратних прекурсорів. Під час цього процесу утворюються нітрозні гази, що містять оксиди азоту (NO_x), які належать до небезпечних забруднювачів атмосферного повітря та потребують обов'язкового очищення перед викидом у навколишнє середовище.

Особливістю газових викидів виробництва каталізаторів є високий вміст оксидів азоту та незначна кількість супутніх домішок. Це створює можливість не лише очищення газового потоку, а й утилізації NO_x з одержанням азотної кислоти як корисного продукту. Тому розроблення ефективної технологічної схеми очищення та утилізації нітрозних газів є актуальним екологічним і технічним завданням.

Метою дипломного проекту є розроблення технологічної схеми очищення та утилізації нітрозних газів, що утворюються під час виробництва гетерогенних каталізаторів, з одержанням азотної кислоти. Для досягнення поставленої мети був проведений аналіз існуючих методів очищення нітрозних газів, обґрунтовано вибір технологічної схеми, виконано технологічні та конструктивні розрахунки основного обладнання установки, розроблено об'ємно-планувальне вирішення виробничого корпусу та розглянуто питання охорони праці під час експлуатації.

					ДП	Арк
						10
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Значення каталізаторів у промисловості

1.1.1 Значення та сфери використання каталізаторів

У сучасному світі досягнення у галузях хімічної, нафтопереробної та природоохоронної промисловості неможливі без участі каталітичних процесів. За даними експертів, понад 90% світових хімічних технологій залежать від застосування каталізаторів, а обсяг ринку каталітичних матеріалів демонструє стабільне щорічне зростання, зумовлене загальною індустріалізацією. Ключова роль каталізаторів полягає у вдосконаленні сполучення термодинамічних та кінетичних характеристик хімічних перетворень. Зменшуючи енергетичний бар'єр реакції (енергію активації E_a), каталізатори роблять можливим здійснення масштабних виробничих процесів засуттєво знижених показників температури та тиску. Це, у свою чергу, веде до скорочення витрат енергії, зменшення матеріаломісткості інженерних споруд і гарантує високу спрямованість на формування бажаних речовин.[1]

Промислові каталізатори знаходять своє застосування у низці ключових галузей економіки.

У нафтохімії та нафтопереробній промисловості вони відіграють вирішальну роль у таких процесах, як каталітичний крекінг, риформінг, гідроочищення та ізомеризація нафтових фракцій. Завдяки каталізаторам досягається перетворення важких складових нафти на цінніші продукти - бензини з вищим октановим числом, дизельні палива, олефіни та ароматичні речовини. [2]

Каталізатори мають важливе значення у виробництві багатьох продуктів органічного та неорганічного синтезу. Їх застосування дає змогу прискорювати перебіг реакцій, підвищувати вихід цільового продукту та знижувати енергетичні витрати процесу. Класичним прикладом є синтез аміаку за процесом Габера - Боша, де використовують залізовмісні

					ДП	Арк
						11
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

каталізатори. Не менш важливим є процес окиснення аміаку до оксиду азоту у виробництві азотної кислоти, який відбувається на платино-родієвих сітках. У технології одержання сірчаної кислоти каталізатори на основі ванадію застосовують для окиснення SO_2 до SO_3 . Також каталіз широко використовують у виробництві формальдегіду, метанолу, полімерів та багатьох інших продуктів великотоннажної хімії.

Екологічний каталіз є важливим окремим напрямом застосування каталізаторів. Каталітичні системи широко використовують у процесах очищення промислових викидів і зменшення негативного впливу виробництва на довкілля. У транспортній сфері для очищення вихлопних газів застосовують трикомпонентні каталізатори на основі платини, паладію та родію. Вони забезпечують одночасне перетворення оксиду вуглецю, незгорілих вуглеводнів і оксидів азоту на менш шкідливі для природи сполуки. У промисловості каталізатори також використовують у процесах селективного відновлення оксидів азоту аміаком або іншими відновниками. Окрім того, їх широко застосовують у технологіях очищення димових і відхідних газів, що дозволяє зменшити викиди забруднювальних речовин в атмосферу.[3].

1.1.2 Класифікація промислових каталізаторів

Залежно від агрегатного стану складових, каталітичні процеси поділяють на гомогенні та гетерогенні. У гомогенному каталізі каталізатор і реагенти перебувають в одному фазовому стані, найчастіше в рідкому. Гетерогенний каталіз передбачає наявність фазової межі: реагенти можуть бути газоподібними або рідкими, а каталізатор є твердою речовиною. Саме гетерогенний каталіз найбільш поширений у промисловості та лежить в основі більшості великотоннажних хімічних виробництв.

Поширення гетерогенних процесів зумовлене їх технологічними перевагами. Потік реагентів проходить крізь шар твердого каталізатора, що

					ДП	Арк
						12
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

забезпечує безперервність процесу, спрощує відокремлення продуктів реакції від каталізатора та знижує витрати на розділення реакційної суміші.

Тверді гетерогенні каталізатори мають пористу структуру, велику поверхню та різноманітні активні центри. За хімічною природою їх поділяють на кілька основних видів. До металічних належать каталізатори на основі платини, паладію, нікелю, міді, заліза та інших металів, які використовують у реакціях гідрування, дегідрування, окиснення та відновлення. Для підвищення ефективності метали зазвичай наносять на пористі основи, що збільшує площу активної поверхні.

Широко застосовують також каталізатори на основі оксидів і сульфідів перехідних металів, зокрема ванадію, хрому, молібдену, цинку та алюмінію. Вони характеризуються високою термічною стійкістю та меншою чутливістю до каталітичних отрут. Окрему групу становлять цеоліти та алюмосилікати - пористі кристалічні сполуки з впорядкованою системою каналів і пор. Завдяки кислотним властивостям та структурі пор вони проявляють формоселективність і широко використовуються у процесах каталітичного крекінгу, ізомеризації та алкілування. [4]

Серед найчастіше застосовуваних у промисловості способів створення каталізаторів методи осадження (включаючи спільне осадження), просочування носія розчинами активних речовин, і механічне змішування з подальшим наданням форми гранул або екструдованих виробів. Процес спільного осадження базується на взаємодії розчинів солей металів з осаджуючим реагентом, у результаті чого утворюються нерозчинні гідроксиди, карбонати або основні солі, що гарантує рівномірне розміщення компонентів у структурі майбутнього каталізатора. При просочуванні пористий наповнювач, типу оксид алюмінію, кремнезем або активоване вугілля, вступає в контакт з розчином, що містить прекурсор активної фази; надлишок розчину видаляється, а активна речовина фіксується у порах носія. Щоб надати каталізатору потрібної форми, його масу додатково змішують із

					ДП	Арк
						13
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

пластифікаторами або сполучними речовинами, а потім формують у вигляді гранул, таблеток, циліндрів чи сферичних частинок.[5]

Незалежно від обраного способу виготовлення, технічний процес отримання каталізаторів завжди завершується двома вирішальними етапами: сушінням та термічною обробкою.

На етапі сушіння відбувається видалення фізично зв'язаної води і залишків розчинних речовин. Зазвичай цей процес здійснюється в спеціальних сушильних камерах чи барабанах, підтримуючи температуру в діапазоні 100 - 120 °С. Цей етап має критичне значення, оскільки надто швидке вилучення вологи може спричинити утворення тріщин у гранулах та порушити внутрішню структуру майбутнього каталізатора.

Наступним етапом є кальцинація, або прожарювання, що проводиться за значно вищих температур. Саме під час прожарювання солі-прекурсори повністю розкладаються, формується оксидна фаза, повністю розгортається пориста структура та закріплюються всі фізико-хімічні характеристики кінцевого продукту.

Температурний режим кальцинації завжди визначається індивідуально. Він залежить безпосередньо від хімічної природи системи та застосованих реагентів, з метою досягнення максимальної активності каталізатора та уникнення його спікання через перегрів.[6]

Під час розкладання нітратів, амонійних сполук або сполук сірки як вихідних речовин, можуть утворюватися леткі другорядні продукти. До них належать оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_x), водяна пара та вуглекислий газ. У промислових масштабах ці викиди мають значний вплив на довкілля, тому виробництво каталізаторів передбачає встановлення систем для очищення викидів виробничих та вентиляційних газів. Скорочення викидів NO_x і SO_x при термічній обробці каталізаторних матеріалів є надзвичайно важливим для екологічно безпечного виробництва каталізаторів і враховується при розробці виробничих схем.[7]

					ДП	Арк
						14
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

1.2 Особливості виробництва каталізаторів із використанням нітратів

Під час розробки твердих гетерогенних каталізаторів вибір вихідних компонентів має важливе значення, оскільки визначає структуру та властивості готового матеріалу. Властивості сировини впливають на формування пористої структури каталізатора, величину питомої поверхні, ступінь дисперсності активного компонента та рівномірність його розподілу на поверхні носія.

Серед прекурсорів активної фази найбільш поширеними є нітрати металів. Їх широке використання пояснюється доброю розчинністю у воді, доступністю та зручністю нанесення на носії. Важливою перевагою є також те, що під час нагрівання нітрат-група розкладається з утворенням газоподібних продуктів - оксидів азоту, кисню та водяної пари. У результаті після термічної обробки в каталізаторі практично не залишається сторонніх аніонних домішок, які можуть впливати на його активність. На відміну від хлоридів і сульфатів, використання нітратів дає змогу отримувати більш чисті оксидні каталітичні матеріали, що особливо важливо для систем, чутливих до каталітичних отрут.[8]

Синтез каталізаторів із використанням нітратів металів найчастіше проводять двома методами - співосадженням або просоченням пористого носія. Під час співосадження водні розчини нітратів активних металів, наприклад заліза, алюмінію, міді, нікелю чи кобальту, змішують із розчином осаджувача - карбонату або гідроксиду натрію чи амонію. У результаті утворюються малорозчинні гідроксиди або основні карбонати металів. На властивості отриманого осаду впливають умови проведення осадження, зокрема швидкість додавання реагентів, температура, рН середовища, оскільки вони визначають розмір частинок і ступінь гомогенізації компонентів.[9]

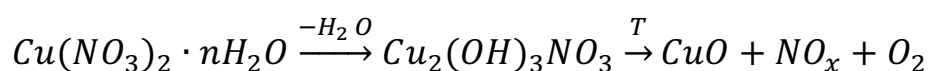
Використання нітратів металів у процесах просочування є особливо поширеним завдяки їх високій розчинності у воді, гарній рухливості іонів у

					ДП	Арк
						15
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

розчині та слабкій взаємодії нітрат-аніона з поверхнею носія. Це сприяє рівномірному розподілу активного компонента в об'ємі пористого матеріалу та забезпечує утворення високодисперсної активної фази після термічного розкладу. Рівномірність нанесення металу є одним із важливих чинників, що визначають доступність активних центрів, каталітичну активність і стабільність каталізатора під час експлуатації.[10]

Ключовим етапом створення каталізаторів з використанням нітратної сировини є термічна обробка отриманих прекурсорів. Під час випалення відбувається термічний розклад нітратів металів, котрий супроводжується, видаленням кристалізаційної води та наступним розкладанням нітрат-іона з формуванням оксидної фази.

Наприклад, для нітрату міді цей процес можна представити як послідовний перехід гідратованої солі через проміжні сполуки до оксиду з виділенням оксидів нітрогену та кисню:



Дуже важливою, для цього етапу, є швидкість нагрівання під час кальцинації. Розклад нітратів супроводжується інтенсивним виділенням газоподібних продуктів, тому, надто швидке збільшення температури може призвести до зростання внутрішнього тиску в порах носія. Це, в свою чергу, може призводити до руйнування пористої структури або активної фази, що призведе до зменшення питомої поверхні та погіршення каталітичних властивостей матеріалу.[11]

Сьогодні дедалі більшої популярності набуває метод спалювання розчинів (solution combustion synthesis - SCS) - спосіб отримання матеріалів шляхом термічного розкладання рідких сумішей. У цьому процесі нітрати металів відіграють подвійну роль: вони є джерелом необхідних іонів металів і одночасно виступають як окисники. Для початку реакції до водного розчину солей додають органічний відновник (паливо) – сечовину, лимонну кислоту або гліцин.

					ДП	Арк
						16
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Коли таку робочу суміш нагрівають, спалахує стрімка й високотемпературна окисно-відновна реакція, яка миттєво охоплює весь об'єм розчину. Через те, що тепло виділяється дуже інтенсивно, і разом із цим утворюється величезна кількість газів, кристали не встигають вирости до великих розмірів.

Завдяки технології спалювання розчинів вдається синтезувати дрібнодисперсні (нанорозмірні) оксидні порошки. Вони мають унікальну структуру: розвинену поверхню з великою кількістю пор та високу концентрацію дефектів у кристалічній ґратці. Такі властивості роблять ці матеріали незамінними в екологічній сфері наприклад, як високоефективні каталізатори для очищення промислових газів та нейтралізації токсичних викидів.[12]

1.3 Технологічний процес одержання каталізатора

Каталізатор для процесу Фішера–Тропша готують шляхом співосадження солей заліза, міді та алюмінію з подальшою термічною обробкою. Основним активним компонентом є оксид заліза, а сполуки міді, калію та алюмінію виконують роль промоторів. Найкращі результати показав каталізатор із теоретичним складом 70 % Fe_2O_3 , 10 % CuO , 5 % K_2O та 15 % Al_2O_3 . Для технологічних розрахунків використовували фактичний склад, визначений методом РФА: 67,6 % Fe_2O_3 , 20,0 % CuO , 2,5 % K_2O та 9,9 % Al_2O_3 .

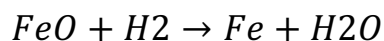
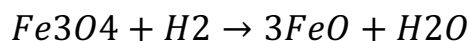
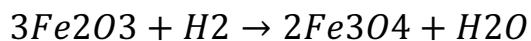
Нітрати заліза, міді та алюмінію завантажують у реактор з мішалкою та нагрівають до 80 - 100 °С. Солі-кристалогідрати плавляться у власній кристалізаційній воді, утворюючи однорідний розплав. Через нього протягом 4 - 6 годин пропускають газоподібний аміак, унаслідок чого утворюються гідроксиди металів та аміакатні комплекси. Наприкінці додають K_2CO_3 , а процес осадження завершують при рН 7 - 8.

					ДП	Арк
						17
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Особливістю методу є відсутність стадій промивання та фільтрації осаду. Використання газоподібного аміаку запобігає накопиченню сторонніх домішок, знижує витрати води та спрощує технологію.

Отриману масу сушать при температурі до 120 °С, після чого нагрівають зі швидкістю 2 - 3 °С/хв до 400 °С. Під час термічної обробки гідроксиди перетворюються на оксиди заліза, міді та алюмінію. Після витримки при 400 °С каталізатор подрібнюють і гранулюють. Для реакторів зі стаціонарним шаром використовують гранули розміром 2 - 3 мм.

Під час роботи каталізатора відбувається послідовне відновлення оксидів заліза:



Під дією СО на поверхні утворюються карбіди заліза, які є активними центрами процесу Фішера–Тропша та забезпечують перетворення синтез-газу у вуглеводні.

Залізо є основним активним компонентом каталізатора, мідь прискорює відновлення оксидів заліза, калій підвищує селективність за рідкими вуглеводнями та зменшує утворення метану, а Al_2O_3 забезпечує механічну й термічну стійкість.

Каталізатор характеризується розвиненою мезопористою структурою та значною питомою поверхнею. У його складі виявлено гематит, магнетит, оксид міді та ферит міді. Найкращі показники отримано при температурі близько 280 °С і тиску 5 атм., за яких досягнуто високої конверсії СО та виходу вуглеводнів фракції C_6^+ . Каталізатор успішно випробувано в лабораторних та пілотних умовах під час переробки синтез-газу, одержаного газифікацією деревної біомаси.[13]

					ДП	Арк
						18
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

1.4 Токсичність і екологічний вплив NO_x

Оксиди азоту NO_x є характерними компонентами газових викидів багатьох хімічних та теплоенергетичних виробництв і належать до небезпечних атмосферних забруднювачів. Основну їх частину становлять монооксид азоту (NO) та діоксид азоту (NO₂). Небезпечність цих сполук пов'язана з тим, що NO в атмосфері окиснюється до більш токсичного та реакційноздатного NO₂.

Діоксид азоту - бурий газ із різким запахом, який навіть у невеликих концентраціях негативно впливає на екосистеми. Оксиди азоту беруть участь у фотохімічних атмосферних процесах і є основними прекурсорами фотохімічного смогу, тропосферного озону та кислотних опадів. Їх накопичення в атмосфері погіршує екологічний стан довкілля.

Потрапляючи в дихальні шляхи, оксиди азоту реагують із вологою слизових оболонок та водяною парою з утворенням азотної (HNO₃) та азотистої (HNO₂) кислот. Це спричиняє подразнення дихальних шляхів, пошкодження епітелію та запалення легеневиx тканин. Тривалий вплив або вдихання високих концентрацій може призвести до токсичного бронхіту, набряку легень і серйозних порушень роботи дихальної системи.

Крім того, продукти розпаду оксидів азоту проникають у кров і сприяють утворенню метгемоглобіну. Така форма гемоглобіну втрачає здатність переносити кисень, що викликає кисневе голодування тканин і органів (гіпоксію).[14]

З метою зменшення негативного впливу NO_x на самопочуття людей, екологічна політика України суворо нормує вміст цих сполук у повітрі. Відповідно до актуальних Державних санітарних норм і розпоряджень Міністерства охорони здоров'я України щодо визначення гранично допустимих концентрацій (ГДК) хімічних елементів у повітрі, для оксидів азоту встановлено наступні нормативи.[15]

Таблиця 1.4.1. - Гранично допустимі концентрації ГДК оксидів азоту в атмосферному повітрі

					ДП	Арк
						19
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Хімічна речовина	Максимальна разова ГДК (ГДК _{м.р.}), мг/м ³	Середньодобова ГДК (ГДК _{с.д.}), мг/м ³	Клас небезпеки
Азоту діоксид (NO ₂)	0,20	0,04	3
Азоту оксид (NO)	0,4	0,06	3

Для промислових об'єктів, що є джерелами забруднення атмосфери, регулювання викидів оксидів азоту відбувається через встановлення нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) згідно з вимогами Закону України «Про охорону атмосферного повітря». Значення ГДВ визначають індивідуально для кожного підприємства під час отримання дозволу на викиди забруднюючих речовин, враховуючи потужність джерела викиду, особливості технологічного процесу та рівень фоновго забруднення атмосфер.

Розрахунок допустимих викидів здійснюють так, щоб концентрація оксидів азоту в атмосфері на межі санітарно-захисної зони не перевищувала встановлених гігієнічних стандартів.

У процесах спалювання палива та інших високотемпературних технологічних процесах концентрацію оксидів азоту у відхідних газах визначають, перераховуючи на NO₂ за стандартних умов (тиск 101,3 кПа, температура 273 К). Моніторинг цих показників забезпечується за допомогою безперервних інструментальних методів.

У зв'язку з цим, використання ефективних каталітичних методів очищення нітрозних газів є важливим технічним засобом зменшення антропогенного впливу на атмосферу та забезпечення відповідності встановленим екологічними нормам.

2. МЕТОДИ УТИЛІЗАЦІЇ НІТРОЗНИХ ГАЗІВ

2.1 Загальна характеристика методів очищення NO_x

Для очищення промислових викидів від нітрозних газів застосовують три основні групи методів: абсорбційні, адсорбційні та каталітичні.

Абсорбційні методи ґрунтуються на поглинанні оксидів азоту водою, кислотами або лугами з подальшою переробкою чи утилізацією продуктів. Адсорбційні методи передбачають вилучення оксидів азоту за допомогою твердих пористих матеріалів, зокрема активованого вугілля, цеолітів та інших сорбентів. Каталітичні методи забезпечують перетворення нітрозних газів на менш шкідливі або безпечні речовини внаслідок реакцій на поверхні каталізаторів і широко використовуються завдяки високій ефективності очищення.

Вибір способу очищення визначається концентрацією та складом газів, їх температурою, наявністю пилу й інших домішок, а також економічними особливостями виробництва. У великотоннажних хімічних виробництвах часто застосовують поєднання кількох методів, що дає змогу досягти високого ступеня очищення та повернення азотовмісних сполук у технологічний цикл.

Однією з головних проблем очищення нітрозних газів є низька розчинність і реакційна здатність монооксиду азоту NO. На відміну від нього, діоксид азоту NO₂ добре розчиняється у воді та бере участь в утворенні нітратної кислоти, тому ефективність абсорбційного очищення значною мірою залежить від співвідношення NO і NO₂ у газовій суміші.

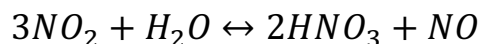
Для підвищення ступеня очищення часто застосовують попереднє окиснення NO до NO₂ перед стадією абсорбції. Такий підхід особливо важливий через те, що в більшості промислових викидів частка монооксиду азоту може перевищувати 90 % від загального вмісту NO_x, що суттєво ускладнює безпосереднє абсорбційне очищення..[16,17]

					ДП	Арк
						21
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

2.2 Абсорбційні та адсорбційні методи утилізації

Сорбційні методи очищення газів від оксидів азоту поділяють на абсорбційні та адсорбційні. Абсорбція передбачає перехід газів у рідкий розчинник, де вони розчиняються або реагують хімічно, а адсорбція — утримання молекул забруднювачів на поверхні твердого сорбенту. Обидва підходи широко застосовують у технологіях очищення газових викидів, часто в поєднанні у багатостадійних схемах.

Найпоширенішим способом утилізації нітрозних газів у виробництві азотної кислоти є абсорбція оксидів азоту водою. Основну роль у процесі відіграє діоксид азоту, який добре поглинається водою та утворює азотну кислоту за реакцією:



Утворений NO переходить у газову фазу та потребує подальшого окиснення, тому ефективність процесу залежить від швидкості окиснення NO до NO₂, а також від температури й тиску. Зниження температури та підвищення тиску покращують поглинання оксидів азоту і збільшують вихід азотної кислоти.

Для газів із невеликим вмістом NO_x використовують лужні абсорбенти, зокрема гідроксид і карбонат натрію або гідроксид кальцію. У цих системах утворюються нітрити та нітрати, а окиснюючі добавки прискорюють окиснення малорозчинного NO.

Адсорбційні методи застосовують переважно на кінцевих стадіях очищення або для вилучення залишкових концентрацій оксидів азоту. Як адсорбенти використовують силікагель, активоване вугілля, цеоліти та оксид алюмінію. Перспективними є синтетичні цеоліти та металоорганічні каркасні структури (MOF), які мають велику питому поверхню та високу селективність щодо оксидів азоту. Насичені адсорбенти регенерують нагріванням або зниженням тиску, що дозволяє їх багаторазово використовувати та, за потреби, повертати азотовмісні сполуки в технологічний процес.[18,19]

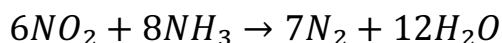
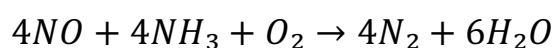
					ДП	Арк
						22
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

2.3 Каталітичні методи очистки газів від NOx

Каталітичні методи очищення газових викидів від оксидів азоту є найбільш ефективними способів зниження кількості NOx у промислових викидах. На відміну від сорбційних процесів, у яких забруднювачі переходять в іншу фазу, каталітичні методи забезпечують їх пряме хімічне перетворення на азот, воду або інші менш шкідливі сполуки. Залежно від механізму каталітичні технології поділяють на процеси відновлення, каталітичного окиснення та розкладу NOx [16].

Найпоширенішим і технологічно відпрацьованим методом є селективне каталітичне відновлення (SCR, Selective Catalytic Reduction). Процес ґрунтується на взаємодії нітрозних газів з аміаком або продуктами розкладу карбаміду в присутності каталізатора. У результаті реакцій утворюються молекулярний азот і вода. У промисловості найчастіше використовують каталізатори системи $V_2O_5 - WO_3/TiO_2$, які ефективно працюють у температурному інтегралі 300 - 400 °C [16,20].

Реакції процесу:



До переваг SCR належать висока ефективність та можливість досягнення дуже низьких залишкових концентрацій оксидів азоту. Серед недоліків слід відзначити необхідність точного дозування відновника та можливість винесення непрореагованого аміаку у разі порушення технологічного режиму.

Крім селективного каталітичного відновлення, для очищення газових потоків можуть застосовуватися процеси відновлення оксидів азоту воднем, вуглеводнями чи оксидом вуглецю. Проте через значні витрати реагентів і залежність ефективності процесу від вмісту кисню такі методи використовуються значно рідше в порівнянні з SCR-технологіями [16].

Важливе місце в технологіях очищення нітрозних газів займає каталітичне окиснення монооксиду азоту до діоксиду азоту. Перетворення

					ДП	Арк
						23
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

NO на NO₂ дає змогу підвищити ефективність подальшої абсорбції та збільшити ступінь вилучення оксидів азоту з газового потоку. Для цього використовують каталізатори на основі оксидів перехідних металів, до прикладу сполуки мангану, кобальту та заліза [16,20].

Одним із перспективних напрямів розвитку каталітичних технологій є прямий розклад оксидів азоту без використання додаткових реагентів:



В цьому процесі досліджують цеолітні каталізатори, модифіковані іонами перехідних металів. Незважаючи на очевидні переваги такого способу, його промислове застосування поки що залишається обмеженим через недостатню стабільність каталізаторів у присутності водяної пари та інших домішок, характерних для промислових газів [16].

Для підприємств азотнокислотної промисловості найбільше значення мають селективне каталітичне відновлення та каталітичне окиснення NO перед стадією абсорбції. Поєднання цих процесів дозволяє досягати сучасних екологічних нормативів і забезпечувати високий ступінь очищення хвостових газів від оксидів азоту [19,20].

2.4 Одержання азотної кислоти

Нітрозні гази утворюються в багатьох галузях хімічної промисловості, зокрема під час виробництва азотної кислоти, синтезу неорганічних солей, термічної переробки нітратів металів, а також у процесах отримання каталізаторів, коли в якості прекурсорів використовують нітратні сполуки. Залежно від складу газового потоку та концентрації оксидів азоту можуть застосовуватися різні методи їх очищення. Але для випадках, коли концентрація NO_x є достатньо високою, доцільним є не лише їх вилучення з газової фази, а й подальше використання для одержання товарних продуктів. Найбільш поширеним прикладом такого підходу є переробка оксидів азоту з одержанням азотної кислоти.

					ДП	Арк
						24
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

На відміну від методів, спрямованих лише на видалення або розкладання оксидів азоту, такі технології дають змогу повертати азотовмісні сполуки у виробничий цикл або використовувати отриманий продукт окремо. Такий підхід не просто зменшує викиди забруднювальних речовин в атмосферу, а й сприяє більш повному використанню сировини та зниженню втрат. Крім того, це дозволяє підвищити загальну ефективність виробництва азотної кислоти та скоротити витрати на очищення газів. [21].

Особливого значення такий спосіб набуває у виробництві азотної кислоти. Після каталітичного окиснення аміаку та абсорбції частина NOx не встигає повністю поглинутися в абсорбційній колоні й виноситься з хвостовими газами. Якщо вони не піддаються додатковому очищенню, вони стають джерелом викидів NOx в атмосферу. Тому на сучасних підприємствах передбачають додаткові стадії уловлювання, доокиснення та повернення нітрозних газів в технологічний цикл. Це дозволяє знизити екологічне навантаження та підвищити ступінь використання азотної сировини [20].

Схему утилізації нітрозних газів обирають з урахуванням параметрів газового потоку: його витрати, температури, тиску та концентрації забрудників. Найпростішим рішенням є повернення частини газового потоку на попередні стадії процесу для повторного поглинання. Однак за значних об'ємів хвостових газів або низького вмісту NOx ефективніше використовувати спеціальні додаткові абсорбційні вузли, інтегровані в систему очистки. У таких схемах процес вилучення оксидів азоту є складовою загального технологічного процесу виробництва азотної кислоти. Це дає можливість повніше використовувати потенціал сировини та зменшувати втрати цінних компонентів [21].

Особливістю таких систем є те, що оксиди азоту розглядаються не як відходи, а як додаткове джерело сировини. Вловлені сполуки повертаються в технологічний цикл і знову беруть участь в утворенні кислоти. У результаті одночасно досягається скорочення викидів та збільшення виходу готового продукту. Для великотоннажних виробництв навіть незначне підвищення

					ДП	Арк
						25
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ступеня вилучення NOx може забезпечити помітне зростання річної продуктивності та зниження питомих витрат аміаку. Саме тому вдосконалення систем очищення хвостових газів є одним із важливих напрямів модернізації азотнокислотних виробництв.

У сучасній практиці частіше за все використовують комбіновані абсорбційно - каталітичні системи очистки. На першому етапі оксиди вилучаються в абсорбційних апаратах з утворенням азотної кислоти різної концентрації, після чого газовий потік надходить на стадію каталітичного доочищення. Для цього застосовують установки селективного каталітичного відновлення (SCR), які забезпечують досягнення нормативних показників по вмісту нітрозних сполук у хвостових газах. Поєднання абсорбційних і каталітичних методів дозволяє підвищити ефективність очищення та зменшити витрати реагентів на стадії каталітичного доочищення. До того ж, така комбінація забезпечує більш стабільну роботу газоочисного обладнання за змінних технологічних режимів.

Сучасні напрями вдосконалення систем очищення хвостових газів пов'язані з підвищенням ефективності масообмінного обладнання, оптимізацією температурних та гідродинамічних режимів, і з розробкою каталізаторів для одночасного видалення NOx і N₂O. Значна увага приділяється підвищенню активності та довговічності каталізаторів, а також зменшенню енерговитрат на проведення процесу. Такі рішення дають змогу підвищити екологічність показники діючих виробництв без суттєвої зміни основної технологічної схеми [20].

Таким чином, утилізація нітрозних газів з одержанням азотної кислоти є ефективним способом поєднання екологічних та економічних переваг. Повернення хвостових газів до технологічного циклу дозволяє зменшити втрати азоту, скоротити викиди забруднюючих речовин і підвищити ефективність роботи виробництва загалом. З цієї причини технології утилізації та повторного використання оксидів азоту залишаються важливим напрямом розвитку сучасної азотнокислотної промисловості.

					ДП	Арк
						26
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

3. РОЗРОБКА ТА ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ

3.1 Обґрунтування вибраної технологічної схеми

Для очищення нітрозних газів, що утворюються під час термічного розкладу нітратів у виробництві каталізаторів, запропоновано триступеневу абсорбційну схему з попереднім охолодженням, усередненням складу газової суміші та доокисненням оксиду азоту. Застосування багатоступеневої системи дозволяє забезпечити високий ступінь очищення відхідних газів від оксидів азоту та одночасно одержувати азотну кислоту як корисний побічний продукт.

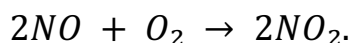
Нітрозні гази, що утворюються під час термічного розкладання нітратів, виходять із реакційної зони з температурою близько 400 °С. Перед подачею на очищення газ надходить у холодильник, де охолоджується до температури приблизно 30 °С. Охолодження є необхідною умовою ефективної абсорбції оксидів азоту, оскільки зі зниженням температури зростає їх розчинність. Крім того, зменшення температури газового потоку дозволяє запобігти надмірному нагріванню поглинальних розчинів і забезпечує стабільну роботу подальшого обладнання.

Розклад нітратів характеризуються нерівномірним виділенням оксидів азоту в часі. На початкових етапах процесу концентрація NO_x є максимальною, а в міру завершення розкладання поступово знижується. Для усунення цих коливань після холодильника і перед системою очищення встановлюється газгольдер, для накопичення та усереднення складу газової суміші. Це дозволяє підтримувати стабільну концентрацію і склад на вході в абсорбційну частину схеми та забезпечує стійку роботу обладнання. Оптимальна концентрація оксидів азоту після усереднення становить близько 10–20 %.

Після газгольдера газова суміш надходить у апарат доокиснення. Ця стадія є необхідною тому, що частина оксидів азоту присутня у формі монооксиду азоту NO , який погано розчиняється у воді та поглинається

					ДП	Арк
						27
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

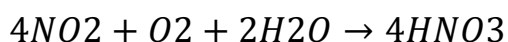
розчином азотної кислоти. Для підвищення ефективності подальшої абсорбції його окиснюють киснем повітря до діоксиду азоту



Діоксид азоту є основний компонент, що бере участь у процесах поглинання та утворення азотної кислоти.

Основне вилучення оксидів азоту відбувається в першому абсорбері, який працює на циркуляційній 60 %-й азотній кислоті. Використання концентрованої кислоти як поглинальної рідини забезпечує високу ефективність уловлювання діоксиду азоту та дозволяє уникнути значного підвищення температури поглинальної рідини, яке виникало б при використанні води за високих концентрацій оксидів азоту.

За повного окиснення:



За чотиригодинний цикл у першому абсорбері вловлюється 163,755 кг NO₂. Хімічно утворюється 224,3 кг нової нітратної кислоти. Кінцевий розчин у баку містить 63,71% чистої HNO₃, 21,58% вільного розчиненого діоксиду азоту. Для підтримання стабільного режиму роботи частина циркуляційної кислоти періодично виводиться з контуру. Перед подальшим використанням або поверненням у технологічний процес кислота може піддаватися десорбції розчинених оксидів азоту шляхом продування повітрям. При цьому оксиди азоту переходять у газову фазу та можуть бути повернуті на початок процесу для повторного уловлювання, що дозволяє зменшити втрати цінних компонентів і підвищити загальну ефективність очищення. Проте в межах даної роботи для спрощення матеріального балансу розрахунок виконано без урахування рециклінгу десорбованих газів, тобто для одноразового проходу газового потоку через систему очищення.

Після першого ступеня очищення газовий потік надходить у другий абсорбер, в якому зрошувальною рідиною виступає вода. У циркуляційну ємність апарата подається 201 кг води. У другому абсорбері вловлюється 5,014 кг NO₂, що забезпечує утворення 6,87 кг азотної кислоти. Після

					ДП	Арк
						28
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

завершення циклу концентрація кислоти в циркуляційному баку становить 3,33 %. Частина розчину періодично відводиться із системи, а натомість подається свіжа вода для підтримання необхідного режиму роботи.

Третій абсорбер виконує функцію доочищення відхідних газів перед їх подачею далі. Через низький залишковий вміст оксидів азоту на цій стадії вловлюється 0,05049 кг NO₂ за цикл. У результаті утворюється 0,069 кг азотної кислоти, а її концентрація в циркуляційній ємності не перевищує 0,03 %. Таким чином, середовище в баку третього абсорбера залишається практично чистим. Кожний абсорбер обладнаний окремою ємністю для поглинальної рідини, що дозволяє підтримувати необхідний склад абсорбенту на кожному ступені очищення. Частина рідини з ємностей періодично виводиться з процесу для використання як товарний продукт або подальшої переробки, що забезпечує стабільність роботи системи та запобігає накопиченню домішок.

Після третього абсорбера газовий потік надходить у електрофільтр, який виконує функцію доочищення. В апараті під дією електричного поля відбувається уловлювання дрібнодисперсних аерозолів азотної кислоти, краплинної вологи та залишкових нітрозних сполук, що не були повністю видалені на попередніх стадіях. Завдяки роботі мокрого електрофільтра досягається остаточне зниження концентрації забруднювальних речовин у газовому потоці до нормативних значень перед його викидом в атмосферу.

Запропонована технологічна схема поєднує високу ефективність очищення нітрозних газів із можливістю утилізації вловлених оксидів азоту у вигляді азотної кислоти. Поєднання стадій усереднення газового потоку, доокиснення оксиду азоту, багатоступеневої абсорбції та доочищення в мокрому електрофільтрі забезпечує глибоке очищення газових викидів і раціональне використання цінних компонентів.

					ДП	Арк
						29
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

3.3 Опис основного обладнання

3.3.1 Холодильник

Важливим елементом запропонованої технологічної схеми є холодильник, призначений для охолодження нітрозних газів перед їх подачею на стадію очищення. Нітрозні гази, що утворюються під час термічного розкладання нітратів, мають температуру близько 400 °С, тому їх попереднє охолодження є необхідною умовою ефективної абсорбції. Для здійснення цього процесу доцільно використовувати кожухотрубний теплообмінник, який характеризується простотою конструкції, надійністю в експлуатації та здатністю забезпечувати певну значну площу теплообміну. У холодильнику температура газового потоку знижується до приблизно 30 °С за рахунок передачі теплоти охолоджувальному агенту. Як холодоносії може використовуватися оборотна вода, що широко застосовується в промислових системах охолодження. Зниження температури газів сприяє підвищенню ефективності подальшого поглинання оксидів азоту, оскільки зі зменшенням температури зростає їх розчинність в рідкій фазі.

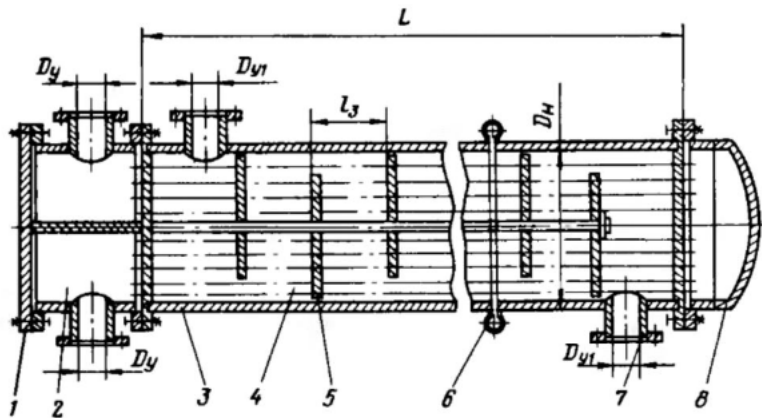


Рисунок 3.3.1.1. - Горизонтальний двоходовий (по трубному простору) кожухотрубний теплообмінник.

Як видно з рисунка 3.1 конструкція включає такі основні елементи:

Кришка розподільчої камери (1) призначена для герметизації торцевої частини апарата та забезпечує доступ до трубної решітки і трубного пучка під час очищення, проведення огляду або ремонту.

					ДП	Арк
						30
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Розподільча камера (2) потрібна для розподілу потоку робочого середовища між ходами теплообмінника. Всередині камери розташована поздовжня перегородка, яка спрямовує середовище через одну частину трубного пучка, потім воно змінює напрямок руху та проходить через другу його частину.

Кожух (3) це циліндричний корпус апарата, всередині якого розміщений трубний пучок. Він формує міжтрубний простір для руху теплоносія та забезпечує механічну міцність конструкції.

Теплообмінні труби (4) є основним елементом апарата, через який відбувається передача теплоти між робочими середовищами. Труби, які закріплені в трубних решітках і утворюють теплообмінну поверхню.

Сегментні перегородки (5) розташовані в міжтрубному просторі та виконують роль опорну і гідродинамічну. Вони запобігають прогину труб і спрямовують потік теплоносія поперек трубного пучка, що сприяє інтенсифікації теплообміну за рахунок підвищення турбулентності потоку.

Компенсатор (6) призначений для компенсації температурних деформацій, які виникають через різницю температур трубного пучка та кожуха. Він використовується для зменшення механічних напружень в конструкції та підвищення надійності роботи апарата.

Штуцери (7) забезпечують підведення та відведення робочих середовищ із трубного та міжтрубного просторів теплообмінника.

Кришка (8) закриває протилежний торець апарата та виконує функцію поворотної камери, у якій потік після проходження першого ходу змінює напрямок руху і надходить у другий хід трубного пучка[22].

Робота холодильника ґрунтується на передачі теплоти від гарячого технологічного потоку до охолоджувального агента (води) через стінки теплообмінних труб. При цьому теплоносії не змішуються між собою, а теплообмін відбувається через металеву поверхню трубного пучка.

Гарячий газ надходить через вхідний штуцер до розподільчої камери (2), де за допомогою поздовжньої перегородки спрямовується в одну частину

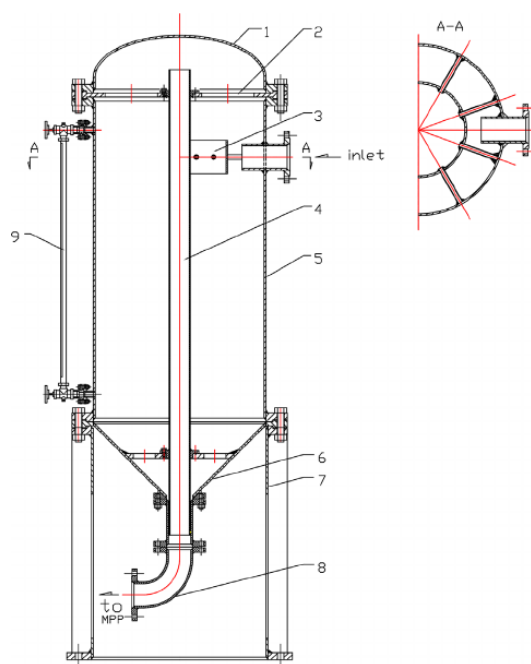
					ДП	Арк
						31
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

теплообмінних труб (4). Проходячи вздовж трубного пучка, потік поступово охолоджується передаючи теплоту через стінки труб. У поворотній кришці (8) газ змінює напрямок руху та повертається через другу частину трубного пучка до розподільчої камери і виводиться з апарата через вихідний штуцер. Двоходова схема забезпечує збільшення швидкості руху середовища в трубах і тривалості його контакту з теплообмінною поверхнею, що сприяє підвищенню ефективності охолодження.

Охолоджувальний агент подається в міжтрубний простір через штуцер і рухається між трубами пучка. Сегментні перегородки (5) змінюють його напрямок руху, забезпечуючи поперечне багаторазове обтікання труб. У результаті підвищується турбулентність потоку та інтенсивність теплопередачі. Під час руху між трубами вода приймає теплоту від гарячого середовища, нагрівається та відводиться з апарата через вихідний штуцер.

Завдяки зустрічному або близькому до протиточного руху потоків у теплообміннику підтримується достатній температурний напір уздовж усієї поверхні теплообміну. Це забезпечує ефективне охолодження газів суміші та дозволяє використовувати апарат у складі систем підготовки нітрозних газів перед подачею їх на подальші стадії процесу.

3.3.2 Газгольдер



					ДП	Арк
						32
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Рисунок 3.3.2.1. - Структура буферної ємності

Для забезпечення стабільної роботи системи очищення після холодильника встановлюється газгольдер, який виконує функцію усереднення складу та витрати нітрозних газів. Його необхідність обумовлена тим, що під час термічного розкладання нітратів виділення оксидів азоту відбувається нерівномірно в часі, внаслідок чого концентрація NO_x у газовому потоці може суттєво змінюватися протягом технологічного циклу. Використання газгольдера дозволяє згладити ці коливання та забезпечити стабільний склад газової суміші перед її подачею на очистку.

Конструктивно газгольдер являє собою вертикальну циліндричну ємність, що складається з верхнього днища (1), корпусу (5) та нижнього днища (6). Усередині апарата розташовані верхня (2) та нижня (3) розподільні перегородки, а також центральна перфорована труба (4), що забезпечує рівномірний розподіл газового потоку по всьому внутрішньому об'єму апарата. Для встановлення на фундаменті передбачена опора (7), а підведення та відведення газів здійснюються через штуцери (8). На схемі також показано показчик рівня (9), який може використовуватися для контролю накопичення конденсату в нижній частині апарата.[23]

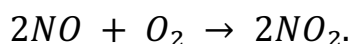
Під час роботи нітрозні гази надходять до газгольдера через вхідний штуцер та потрапляють до центральної перфорованої труби. Через отвори в її стінках газ рівномірно розподіляється по всьому об'єму апарата, де відбувається змішування окремих порцій потоку з різною концентрацією оксидів азоту. Завдяки достатньому внутрішньому об'єму газгольдера забезпечується усереднення складу газової суміші та вирівнювання короточасних коливань її витрати. У результаті на виході з апарата формується потік зі стабільними характеристиками, який далі направляється на стадію доокиснення та абсорбційного очищення.

					ДП	Арк
						33
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

3.3.3 Доокиснювач

Після газгольдера газова суміш надходить у доокиснювач, призначений для переведення монооксиду азоту NO у діоксид азоту NO₂ перед подачею на стадію абсорбції. Необхідність обумовлена поганою розчинністю і відносно низькою реакційною здатністю монооксид азоту в порівнянні з діоксидом азоту .

У газовій суміші після розкладання нітратів міститься достатня кількість кисню для перебігу реакції окиснення, тому додаткове введення окисника не передбачається. У зв'язку з цим доокиснювач являє собою камеру контакту, призначенням якої є забезпечення необхідного часу перебування газів для протікання реакції



Швидкість окиснення оксиду азоту зростає зі зниженням температури, а відповідна температура газів досягається на початку процесу. За таких умов створюється сприятливе середовище для утворення діоксиду азоту, який надалі ефективно вилучається на стадіях абсорбційного очищення.

Таким чином, доокиснювач виконує функцію камери витримки, у якій відбувається доокиснення оксиду азоту за рахунок кисню, що вже міститься в газовому потоці, без використання додаткових реагентів або каталізаторів.

3.3.3. Абсорбер

					ДП	Арк
						34
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

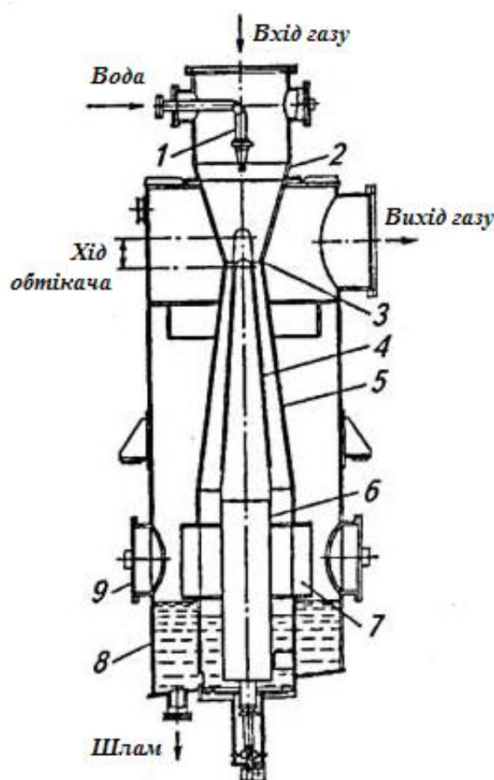


Рисунок 3.3.3.1. - Скрубер Вентурі з регульованим кільцевим перерізом горловини.

Для поглинання оксидів азоту в технологічній схемі використовуються швидкісні абсорбери типу скруберів Вентурі з регульованою горловиною. У першому апараті як поглинальна рідина використовується 60 %-ва азотна кислота, тоді як у другому та третьому абсорберах зрошення здійснюється водою. Застосування скруберів Вентурі забезпечує інтенсивний контакт між газовою та рідкою фазами, що сприяє ефективному вилученню оксидів азоту.

Конструкція апарата включає форсунку (1) для подачі поглинальної рідини, конфузор (2), горловину (3), регулюючий конус (4), дифузор (5), направляючий шток (6), завихрювач (7), сепараційну камеру (8) та люк для обслуговування (9). Наявність рухомого конуса дозволяє змінювати площу прохідного перерізу горловини та підтримувати необхідну швидкість газу при зміні продуктивності установки.

Під час роботи нітрозні гази надходять у конфузор, де їх швидкість поступово збільшується. Одночасно через форсунку в апарат подається зрошувальна рідина. У горловині під дією високошвидкісного газового

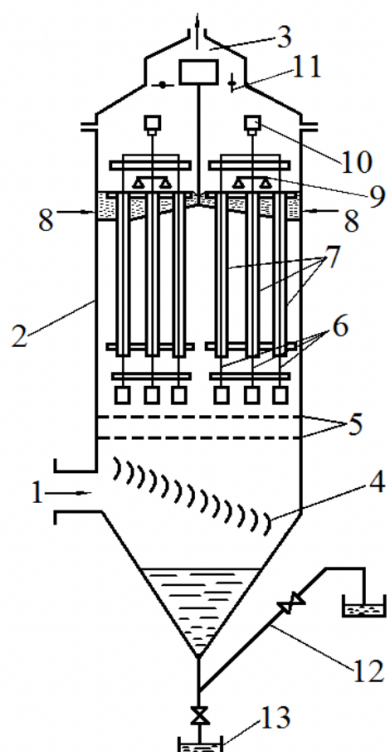
					ДП	Арк
						35
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

потіку рідина диспергується на дрібні краплі, утворюючи велику поверхню контакту між фазами. Саме в цій зоні відбувається основне поглинання діоксиду азоту рідкою фазою та утворення азотної кислоти.

Після проходження горловини газ надходить у дифузор, де швидкість потоку зменшується, а далі в сепараційну камеру. За допомогою завихрювача потік набуває обертального руху, внаслідок чого краплі рідини відокремлюються від газу під дією відцентрових сил. Вловлена рідина стікає в нижню частину апарата та повертається до циркуляційної ємності, тоді як очищений газ направляється далі.[24]

Використання швидкісних абсорберів типу скруберів Вентурі дозволяє досягти високої інтенсивності масообміну при відносно невеликих габаритах апарата, що робить їх ефективними для очищення нітрозних газів та одержання розчинів азотної кислоти різної концентрації.

3.3.4 Електрофільтр



Риунок 3.3.4.1 - Однопільний вертикальний електрофільтр типу ДМ

Мокрий електрофільтр використовується для високоефективного очищення газового потоку від дрібнодисперсних частинок пилу, кислотних

					ДП	Арк
						36
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

туманів, а також рідких аерозолів. Вихідний забруднений газ подається в апарат через патрубок підведення газу (1) і спрямовується у внутрішній об'єм корпусу електрофільтра (2). Рівномірний розподіл газового потоку по всьому робочому перерізу апарата досягається завдяки системі направляючих лопаток (4) та спеціальних розподільчих решіток (5), що гарантує стабільні й оптимальні аеродинамічні умови для проходження процесу сепарації.

У робочому просторі апарата між коронуючими (6) та осаджувальними (7) електродами створюється електричне поле високої напруги. У результаті виникає коронний розряд, через який іонізується газ, внаслідок чого дисперсні частинки пилу та краплі туману набувають стійкого електричного заряду. Під дією сил електричного поля заряджені частинки направляються до поверхні заземлених осаджувальних електродів (7), де й затримуються.

Конструктивною специфікою мокрого типу електрофільтрів є безперервне зрошення поверхні осаджувальних електродів водою, яка подається через систему подачі води (8). Стікаюча рідинна плівка постійно змиває накопичені забруднення, повністю виключаючи ризик їх повторного винесення (вторинного виносу) з очищеним газом. Для проведення періодичної інтенсивної промивки внутрішніх елементів конструкції передбачено колектор з бризкалами (9).

Електрична ізоляція коронуючих електродів від заземленого корпусу забезпечується за допомогою ізоляторів (10). Регулювання та підтримання заданої витрати газу через очисну систему здійснюється за допомогою дросельного клапана (11).

Уловлені забруднення разом із промивною рідиною безперервно стікають у нижню конічну частину апарата, обладнану гідрозатором (12). Виведення накопиченого шлам-конденсату здійснюється в безперервному або періодичному режимі через спеціальний вузол відведення шламу (13). Очищений від домішок газовий потік виходить з верхньої зони апарата через патрубок відведення очищеного газу (3) і спрямовується далі або на викид.

					ДП	Арк
						37
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

У промисловій схемі санітарного очищення нітрозних газів даний мокрий електрофільтр встановлено безпосередньо після абсорбційних колон. Його головним завданням є фінішне вловлювання залишкового туману азотної кислоти та субмікронних аерозолів, які не вдалося затримати в скруберах. Ефективна дія високоінтенсивного електричного поля дозволяє успішно сепарувати ультрадисперсні частинки розміром менше 1 мкм. Це забезпечує суттєве зниження технологічних втрат цільової азотної кислоти, максимізує загальний ступінь очищення відхідних газів від токсичних оксидів азоту та гарантує відповідність виробництва чинним екологічним стандартам.

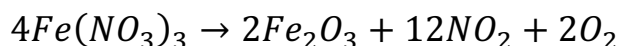
4. РОЗРАХУНКИ

4.1 Характеристика вихідних газів

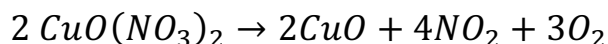
Оскільки етап сушіння за 120 °C триває цілу добу, вся вільна волога та вода від розкладання гідроксидів повністю виводяться з печі ще до початку прожарювання. Таким чином, гази, які виділяються протягом наступних 4 годин при 400 °C, є сухими.

Розрахуємо склад вихідного газу виходячи зі складу каталізатора

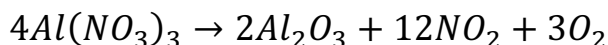
Fe_2O_3 – 67,6%, CuO – 20%, K_2O – 2,5 %, Al_2O_3 – 9,9%



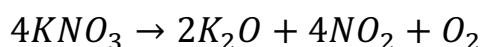
$$Fe_2O_3: \frac{6,76}{160} = 42,25 \text{ моль. } NO_2: 42,25 * 6 = 253,5 \text{ моль}$$



$$CuO: \frac{2}{80} = 25 \text{ моль. } NO_2: 25 * 2 = 50 \text{ моль}$$



$$Al_2O_3: \frac{0,99}{102} = 9,7 \text{ моль. } NO_2: 9,7 * 6 = 58,2 \text{ моль}$$



$$K_2O: \frac{0,25}{94} = 2,66 \text{ моль. } NO_2: 2,66 * 2 = 5,3 \text{ моль}$$

					ДП	Арк
						38
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Загальна кількість діоксиду азоту буде складати 367 моль, що відповідає 16,7 кг NO₂ на 10 кг виробленого каталізатора.

Відповідно, на 100 кг каталізатора загальна кількість речовини оксидів нітрогену становить:

$$n_{\text{заг}}(\text{NO}_x) = 367 * 10 = 3670 \text{ моль}$$

За високих температур (на виході з печі газу будуть мати температуру 350 - 400 °С) діоксид нітрогену частково дисоціює ($\text{NO}_2 \leftrightarrow 2\text{NO} + \text{O}_2$). Приймаємо ступінь дисоціації $\alpha = 0,15$.

Розрахуємо мольний склад сухого газу:

$$n(\text{NO}) = n_{\text{заг}}(\text{NO}_x) * \alpha = 3670 * 0,15 = 550,5 \text{ моль}$$

$$n(\text{NO}_2) = n_{\text{заг}}(\text{NO}_x) * (1 - \alpha) = 3670 * 0,85 = 3119,5 \text{ моль}$$

Кількість речовини кисню складатиметься з утвореного від розкладання солей за хімічними рівняннями (917,5 моль на 100 кг каталізатора), та додаткового кисню від дисоціації NO₂

$$n(\text{O}_2) = 917,5 + \frac{n(\text{NO})}{2} = 917,5 + \frac{550,5}{2} = 1192,75 \text{ моль}$$

Об'єм газу за нормальний умов:

$$V_{\text{н.у.}} = n_{\text{сух}} * 0,0224 = 4862,74 * 0,0224 = 108,93 \text{ м}^3$$

Реальний об'єм газу за температури 400 С.

$$V_{400} = V_{\text{н.у.}} * \frac{673,15}{273,15} = 108,93 * 2,4643 = 268,44 \text{ м}^3$$

Час прожарювання, а отже і час подачі газів на очистку складає 4 години, тому швидкість потоку:

$$Q = \frac{268,44}{4} = 67,11 \text{ м}^3/\text{год}$$

Робочі концентрації речовин в гарячих газах:

$$C_{400}(\text{NO}_2) = \frac{3119,5 * 46}{268,44} = 534,5 \text{ г/м}^3$$

$$C_{400}(\text{NO}) = \frac{550,5 * 30}{268,44} = 61,5 \text{ г/м}^3$$

					ДП	Арк
						39
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

$$C_{400}(O_2) = \frac{1192,75 * 32}{268,44} = 142,2 \text{ г/м}^3$$

NO₂ – 64,15%, NO – 11,32%, O₂ – 24,53 %.

Газ з печі буде виноситись потоком повітря тому загальний об'єм газу на виході з печі буде 548,07 м³, тож склад вихідних газув які подаються на систему очистки:

NO₂ – 12,75%, NO – 2,25 %, O₂ – 21,7%, 63,3% - повітря.

4.2 Матеріальний баланс

Перший холодильник

Гарячий сухий газ із температурою 400 °С заходить у трубний простір холодильника, де охолоджується оборотною водою до 30 °С (303,15 К). Оскільки в газі немає вологи, жодних хімічних реакцій та конденсації кислоти тут не відбувається. Оксид нітрогену через швидкість руху газу і брак часу контакту також не встигає окиснитися.

Об'єм газу після з холодильника:

$$V_{30} = V_{н.у.} * \frac{303,15}{273,15} = 548,07 * 1,1098 = 608,25 \text{ м}^3$$

Склад газів залишається таким самим.

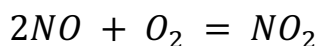
Газголдер

Газоголдер потрібен для того, щоб зрівняти концентрація газів, оскільки нітрати розкладаються не лінійно в часі.

Склад газів, що іде на доокиснювач:

NO₂ – 12,75%, NO – 2,25 %, O₂ – 21,7%, 63,3% - повітря.

Доокиснювач



Оскільки кисню в потоці знаходиться в надлишку (5309,75 моль), додаткового джерела кисню подавати в доокиснювач не потрібно.

На окиснення 2 молів NO потрібен один моль O₂, отже на окиснення всього оксиду азоту витратиться $550,5/2 = 275,25$ молів кисню.

Кількість NO₂ на виході з доокиснювача:

					ДП	Арк
						40
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

$$n(NO_2) = n(NO) + n(NO_2) = 3119,5 + 550,5 = 3670 \text{ моль}$$

Загальна кількість молів газу на виходу з доокиснювача:

$$3670 + 5034,5 + 15485,3 = 24189,8 \text{ моль.}$$

Об'єм газу на виході:

$$V_{\text{вих}} = 24189,8 * 0,0224 = 541,85 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{вих } 30} = \frac{303,15}{273,15} = 541,85 * 1,1098 = 601,35 \text{ м}^3$$

Витрати газу $Q = 150,34 \text{ м}^3/\text{год.}$

Склад газової суміші: $NO_2 - 15,17\%$, $O_2 - 20,82\%$, повітря – $64,02\%$.

Перший абсорбер

Вхідна концентрація діоксиду азоту:

$$C_{\text{вхід}} = \frac{168820000}{541,85} = 311563 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$$

Перший абсорбер має ефективність 97% .

Маса вловленого діоксиду азоту:

$$M = 168,82 * 0,97 = 163,755 \text{ кг}$$

Маса NO_2 , що переходить на другий абсорбер:

$$M = 168,82 - 163,755 = 5,065 \text{ кг}$$

Концентрація NO_2 , що іде на другий абсорбер.

$$C = \frac{5065000}{541,85} = 9347,6 \text{ мг/м}^3$$

Другий абсорбер

Ефективність другого абсорбера складає 99% .

Маса вловленого діоксиду

$$M = 5,065 * 0,99 = 5,014 \text{ кг}$$

Маса діоксиду, що залишився у газовій суміші.

$$M = 5,065 - 5,014 = 0,051 \text{ кг}$$

Концентрація на виході з другого абсорбера:

$$C = \frac{51000}{541,85} = 94,12 \text{ мг/м}^3$$

Третій абсорбер

					ДП	Арк
						41
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Ефективність другого абсорбера складає 99%.

Маса вловленого діоксиду

$$M = 0,051 * 0,99 = 0,05049 \text{ кг}$$

Маса діоксиду, що залишився у газовій суміші.

$$M = 0,051 - 0,05049 = 0,00051 \text{ кг}$$

Концентрація на виході з другого абсорбера:

$$C = \frac{510}{541,85} = 0,9 \text{ мг/м}^3$$

Мокрий електрофільтр

На його мокрих електродах під дією електричного поля та озону ефективність вловлювання залишків газоподібного NO₂ та субмікронного туману складе щонайменше 96%.

Кінцева маса NO₂

$$M = 0,00051 * (1 - 0,96) = 0,0000204 \text{ кг}$$

Кінцева концентрація

$$C = \frac{20,4}{541,85} = 0,0376 \text{ мг/м}^3$$

$$0,0376 \text{ мг/м}^3 < 0,04 \text{ мг/м}^3$$

4.3 Теплообмінники

Для розрахунку холодильника, спочатку потрібно визначити теплоємність газу.

Склад: NO₂ – 12,75%, NO – 2,25 %, O₂ – 21,7%, 63,3% - повітря.

$$\begin{aligned} C_{p,\text{сум}(215^\circ\text{C})} &= (42,8 * 0,1275) + (30,4 * 0,0225) + (30,9 + 0,217) \\ &+ (1005 * 0,633) = 5,457 + 0,684 + 6,7053 + 4,26 \\ &= 17,1 \text{ Дж/моль} * \text{К} \end{aligned}$$

Також знайдемо густину газу за температури 215°C

$$\begin{aligned} \rho_{215^\circ\text{C}} &= (1,22 * 0,1275) + (0,91 * 0,0225) + (0,82 * 0,217) + (0,74 * 0,633) \\ &= 0,822 \text{ г/л} \end{aligned}$$

І об'єм газу за 215°C.

					ДП	Арк
						42
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

$$V_{215} = V_{\text{н.у.}} * \frac{488,25}{273,15} = 137,02 * 1,7871 = 244,87 \text{ м}^3$$

Знайдемо кількість теплоти, що відводиться в холодильник:

$$Q = V * \rho * (t_n - t_k) * C_p = 244,87 * 0,822 * (400 - 30) * 38,5 \\ = 2,87 * 10^6 \text{ Дж}$$

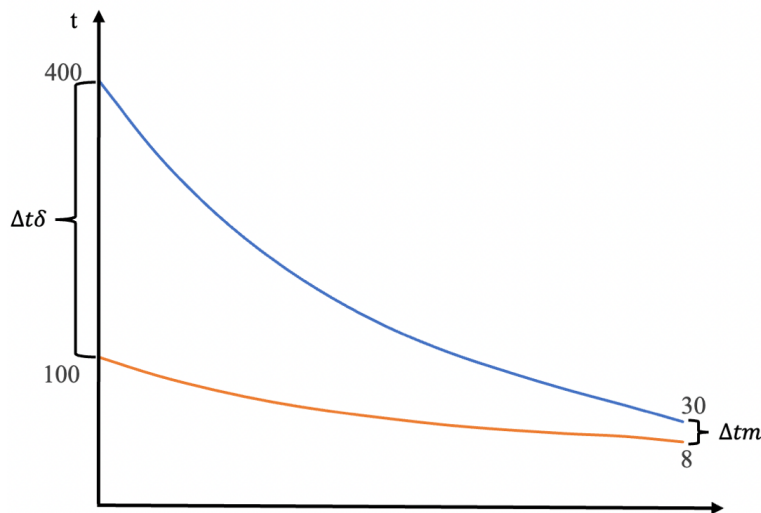


Рисунок 4.3.1. Графік зміни температури теплоносіїв у холодильнику газу

Далі шукаємо площу холодильника:

$$\Delta t = \frac{\Delta t \delta - \Delta t m}{\ln \frac{\Delta t \delta}{\Delta t m}} = \frac{300 - 22}{\ln \frac{300}{22}} = 106,4$$

$$F = \frac{Q}{K * \Delta t} = \frac{2,87 * 10^6}{45 * 106,4} = 599,4 \text{ м}^2$$

За площею поверхні підбираємо холодильник марки ТН-1000-606 4-х ходовий холодильник, з діаметром труб 20×2 мм.

Холодильник для кислоти

$$Q = 215 * (20 - 7) * 1740 = 4,86 * 10^6 \text{ Дж}$$

					ДП	Арк
						43
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

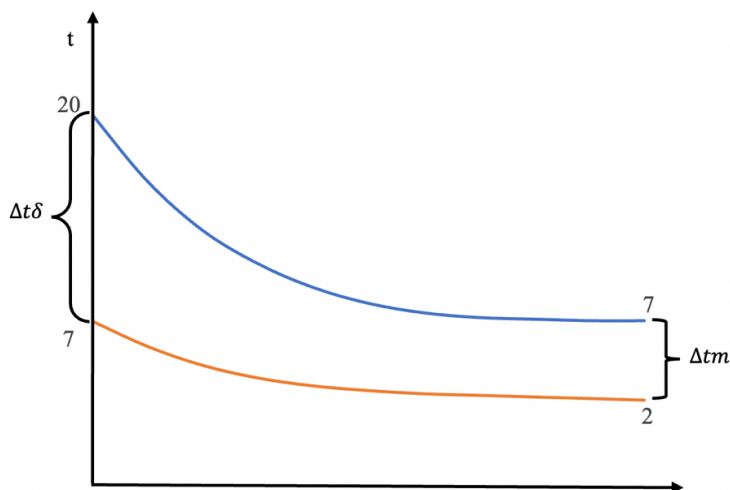


Рисунок 4.3.2. - Графік зміни температури теплоносіїв у холодильнику для рідин

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}} = \frac{14 - 5}{\ln \frac{14}{5}} = 8,74$$

$$F = \frac{Q}{K * \Delta t} = \frac{4,86 * 10^6}{800 * 8,74} = 695 \text{ м}^2$$

4 ходовий холодильник ТН-1200-697 з діаметром труб 25×2.

Холодильники для води

$$Q = 201 * (20 - 7) * 4186 = 1,09 * 10^7 \text{ Дж}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}} = \frac{14 - 5}{\ln \frac{14}{5}} = 8,74$$

$$F = \frac{Q}{K * \Delta t} = \frac{1,09 * 10^7}{1700 * 8,74} = 734 \text{ м}^2$$

2 ходовий холодильник ТН-1200-740 з діаметром труб 25×2.

4.4 Абсорбери

Витрата газу $Q = 150,34 \text{ м}^3/\text{год}$

$$C(\text{NO}_2) = 311563 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$$

Температура газу на вході – 30 С.

Вихідна концентрація – 9347,6 мг/м³

Зрошувальна рідина – концентрована азотна кислота.

Об'ємна концентрація діоксиду азоту на вході:

					ДП	Арк
						44
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

$$W_{\text{вх}} = \frac{C * V_m}{M_{\text{NO}_2}} * 100 = \frac{0,311563 * 22,4}{46,01} * 100 = 15,17 \text{ об. \%}$$

Тоді щільність газу на вході в абсорбер:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \left(\rho_{\text{NO}_2} * \frac{W}{100} \right) + \left(\rho_{\text{пов}} * \frac{W}{100} \right) \\ &= \left(2,05 * \frac{15,17}{100} \right) + \left(1,293 * \frac{64,3}{100} \right) + \left(1,429 * \frac{20,82}{100} \right) = 1,4399 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Розраховуємо необхідну ефективність роботи апарату:

$$\eta = 1 - \frac{9347,6}{311563} = 0,9977$$

Розрахунок числа одиниць переносу:

$$N = \ln \frac{1}{1 - 0,9977} = 6,07$$

Візьмемо коефіцієнти для речовин з різким запахом і знайде питому енергію K, що витрачається на газовловлювання

$$6,07 = 1,09 * 10^{-5} * K^{1,4146}$$

Звідси K = 11900 кДж/1000 м³ газу.

Питоме зрошення приймаємо – 1,3 дм³/м³

Загальний гідравлічний опір:

$$\Delta P = 11900 - 300000 * 0,0013 = 11510 \text{ Па}$$

Перед скруббером тиск складає 1 атм, розрахуємо щільність газу на вході в скруббер при робочих умовах:

$$\rho = 1,4399 * \frac{273}{273 + 30} = 1,2973 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Витрата газу за робочих умов:

$$V = \frac{150,34 * 1,4399}{3600 * 1,2973} = 0,046 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 165,6 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Витрата рідини для зрошення

$$M = 0,0013 * 0,046 * 1000 = 0,0598 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 215,28 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Гази зрошуються холодною азотною кислотою тому температуру газу на виходу приймаємо 10С.

					ДП	Арк
						45
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Тоді щільність газів на виході:

$$\rho = 1,4399 * \frac{273 * (101,3 * 10^3 - 11510)}{(273 + 10) * 101,3 * 10^3} = 1,23 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Витрата газу на виходу з труби Вентурі:

$$V = \frac{150,34 * 1,4399}{3600 * 1,23} = 0,0489 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Приймаємо $\xi_{\text{кр}} = 20$, тоді гідравлічний опір краплевловлювача:

$$\Delta P = 20 * 4,5^2 * \frac{1,23}{2} = 249 \text{ Па}$$

Гідравлічний опір труби Вентурі буде:

$$\Delta P = 11510 - 249 = 11261 \text{ Па}$$

Підвід зрошення приймаєм центральний $\xi_{\text{сух}} = 0,15$

$$\xi = 0,63 * 0,15 * 0,0013^{-0,3} = 0,69$$

Визначимо швидкість газів у горловині:

$$v = \sqrt{\frac{2 * 11261}{0,15 * 1,23 + 0,69 * 1000 * 0,0013}} = 144,3 \text{ м/с}$$

Діаметр труби горловини:

$$d = 1,13 * \sqrt{\frac{0,0489}{144,3}} = 0,021 \text{ м}$$

Обираємо скруббер моделі СВ1150/1020-2400 з діаметром горловини 1150 мм, продуктивністю 180-120 м³/год, висота – 13165 мм, діаметром краплевловлювача 2400 мм і масою 14,17 т.

Другий абсорбер

Витрата газу $Q = 150,34 \text{ м}^3/\text{год}$

$C(\text{NO}_2) = 9347,6 \text{ мг/м}^3$

Температура газу на вході – 10 С.

Вихідна концентрація – 94,12 мг/м³

Зрошувальна рідина – вода.

Об'ємна концентрація діоксиду азоту на вході:

					ДП	Арк
						46
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

$$W_{\text{вх}} = \frac{C * V_m}{M_{\text{NO}_2}} * 100 = \frac{0,093476 * 22,4}{46,01} * 100 = 4,5 \text{ об. \%}$$

Тоді щільність газу на вході в абсорбер:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \left(\rho_{\text{NO}_2} * \frac{W}{100} \right) + \left(\rho_{\text{пов}} * \frac{W}{100} \right) \\ &= \left(2,05 * \frac{4,5}{100} \right) + \left(1,293 * \frac{74,68}{100} \right) + \left(1,429 * \frac{20,82}{100} \right) = 1,3554 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Розраховуємо необхідну ефективність роботи апарату:

$$\eta = 1 - \frac{94,12}{9347,6} = 0,9899$$

Розрахунок числа одиниць переносу:

$$N = \ln \frac{1}{1 - 0,9899} = 4,595$$

Візьмемо коефіцієнти для речовин з різким запахом і знайде питому енергію К, що витрачається на газовловлювання

$$4,595 = 1,09 * 10^{-5} * K^{1,4146}$$

Звідси К = 9400 кДж/1000 м³ газу.

Питоме зрошення приймаємо – 1,3 дм³/м³

Загальний гідравлічний опір:

$$\Delta P = 9400 - 300000 * 0,0013 = 9010 \text{ Па}$$

Перед скруббером тиск складає 1 атм, розрахуємо щільність газу на вході в скруббер при робочих умовах:

$$\rho = 1,3554 * \frac{273}{273 + 10} = 1,3075 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Витрата газу за робочих умов:

$$V = \frac{150,34 * 1,3554}{3600 * 1,3075} = 0,043 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 154,8 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Витрата рідини для зрошення

$$M = 0,0013 * 0,043 * 1000 = 0,0559 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 201,24 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

					ДП	Арк
						47
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Гази зрошуються холодною азотною кислотою, але процес розчинення діоксиду азоту у воді це екзотермічна реакція температуру газу на виходу приймаємо 10С.

Тоді щільність газів на виході:

$$\rho = 1,3554 * \frac{273 * (101,3 * 10^3 - 9010)}{(273 + 10) * 101,3 * 10^3} = 1,19 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Витрата газу на виходу з труби Вентурі:

$$V = \frac{150,34 * 1,3554}{3600 * 1,19} = 0,048 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Приймаємо $\xi_{\text{кр}} = 20$, тоді гідравлічний опір краплевловлювача:

$$\Delta P = 20 * 4,5^2 * \frac{1,19}{2} = 240,98 \text{ Па}$$

Гідравлічний опір труби Вентурі буде:

$$\Delta P = 9010 - 240,98 = 8769 \text{ Па}$$

Підвід зрошення приймаєм центральний $\xi_{\text{сух}} = 0,15$

$$\xi = 0,63 * 0,15 * 0,0013^{-0,3} = 0,69$$

Визначимо швидкість газів у горловині:

$$v = \sqrt{\frac{2 * 8767,1}{0,15 * 1,1997 + 0,69 * 1000 * 0,0013}} = 127,6 \text{ м/с}$$

Діаметр труби горловини:

$$d = 1,13 * \sqrt{\frac{0,048}{127,6}} = 0,022 \text{ м}$$

Обираємо скруббер моделі СВ1150/1020-2400 з діаметром горловини 1150 мм, продуктивністю 180-120 м³/год, висота – 13165 мм, діаметром краплевловлювача 2400 мм і масою 14,17 т.

Третій абсорбер

Витрата газу Q = 150,34 м³/год

C(NO₂)= 94,12 мг/м³

Температура газу на вході – 10 С.

Вихідна концентрація – 0,9 мг/м³

					ДП	Арк
						48
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Зрошувальна рідина – вода.

Об'ємна концентрація діоксиду азоту на вході:

$$W_{\text{вх}} = \frac{C * V_m}{M_{\text{NO}_2}} * 100 = \frac{0,0009412 * 22,4}{46,01} * 100 = 0,46 \text{ об. \%}$$

Тоді щільність газу на вході в абсорбер:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \left(\rho_{\text{NO}_2} * \frac{W}{100} \right) + \left(\rho_{\text{пов}} * \frac{W}{100} \right) = \left(2,05 * \frac{0,46}{100} \right) + \left(1,293 * \frac{98,54}{100} \right) \\ &= 1,2836 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Розраховуємо необхідну ефективність роботи апарату:

$$\eta = 1 - \frac{0,9}{94,12} = 0,99$$

Розрахунок числа одиниць переносу:

$$N = \ln \frac{1}{1 - 0,99} = 4,6$$

Візьмемо коефіцієнти для речовин з різким запахом і знайде питому енергію К, що витрачається на газовловлювання

$$4,6 = 1,09 * 10^{-5} * K^{1,4146}$$

Звідси $K = 9410 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газу}$.

Питоме зрошення приймаємо – $1,3 \text{ дм}^3/\text{м}^3$

Загальний гідравлічний опір:

$$\Delta P = 9410 - 300000 * 0,0013 = 9020 \text{ Па}$$

Перед скруббером тиск складає 1 атм, розрахуємо щільність газу на вході в скруббер при робочих умовах:

$$\rho = 1,2836 * \frac{273}{273 + 10} = 1,238 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Витрата газу за робочих умов:

$$V = \frac{150,34 * 1,2836}{3600 * 1,238} = 0,043 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 154,8 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Витрата рідини для зрошення

$$M = 0,0013 * 0,043 * 1000 = 0,0559 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 201,24 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

					ДП	Арк
						49
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Гази зрошуються холодною водою, але процес розчинення діоксиду азоту у воді це екзотермічна реакція температуру газу на виходу приймаємо 10С.

Тоді щільність газів на виході:

$$\rho = 1,2836 * \frac{273 * (101,3 * 10^3 - 9020)}{(273 + 10) * 101,3 * 10^3} = 1,13 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Витрата газу на виходу з труби Вентурі:

$$V = \frac{150,34 * 1,2836}{3600 * 1,13} = 0,047 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Приймаємо $\xi_{\text{кр}} = 20$, тоді гідравлічний опір краплєвловлювача:

$$\Delta P = 20 * 4,5^2 * \frac{1,13}{2} = 228,83 \text{ Па}$$

Гідравлічний опір труби Вентурі буде:

$$\Delta P = 9020 - 228,83 = 8791,17 \text{ Па}$$

Підвід зрошення приймаєм центральний $\xi_{\text{сух}} = 0,15$

$$\xi = 0,63 * 0,15 * 0,0013^{-0,3} = 0,69$$

Визначимо швидкість газів у горловині:

$$v = \sqrt{\frac{2 * 8791,17}{0,15 * 1,13 + 0,69 * 1000 * 0,0013}} = 128,4 \text{ м/с}$$

Діаметр труби горловини:

$$d = 1,13 * \sqrt{\frac{0,047}{128,4}} = 0,022 \text{ м}$$

Обираємо скрубєр моделі СВ1150/1020-2400 з діаметром горловини 1150 мм, продуктивністю 180-120 м³/год, висота – 13165 мм, діаметром краплєвловлювача 2400 мм і масою 14,17 т.

4.5 Мокрий електрофільтр

Витрата газу Q = 150,34 м³/год

C(NO₂)= 0,9 мг/м³

Температура газ у на вході – 10 С.

					ДП	Арк
						50
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Вихідна концентрація – 0,0376 мг/м³

Щільність газу на входу

$$\beta = \frac{101,3 * 273}{101,3 * (273 + 10)} = 0,96$$

Критична напруженість поля

$$E_{кр} = 3,04 \left(0,96 + 0,0311 * \frac{0,96}{0,001} \right) * 10^6 = 94 * 10^6 \text{ В/м}$$

Напруга корони критична

$$U_{кр} = 94 * 10^6 * 0,001 \left(\frac{3,14 * 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 * 3,14 * 0,001}{0,18} \right) = 561,391 * 10^3 \text{ В}$$

Визначимо напруженість поля при робочих умовах (U = 600 кВ)

$$E = \left[\frac{8 * 3,14 * 0,0423 * 0,15 * 600 * (600 - 561) * 10^6}{9 * 10^9 * 8,85 * 10^{-12} * 0,18^3 * \left(\frac{3,14 * 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 * 3,14 * 0,001}{0,18} \right)} \right]^{0,5}$$
$$= 1,16 * 10^6 \text{ В/м}$$

Необхідна площа активного перерізу:

$$S = \frac{150,34}{3500 * 1,2} = 0,036 \text{ м}^2$$

Оскільки витрати газу невелика, і електрофільтр використовується для доочистки оберемо фільтр марки С-5,0 з площею акивного перерізу – 5 м², активна довжина електричного поля – 3,5 м, діаметром корпуса 3,9 м і висотою 13,3 м.

5. БУДІВЕЛЬНА ЧАСТИНА.

5.1 Об'ємно - планувальне вирішення будівлі

Об'ємно - планувальне вирішення головного виробничого корпусу виконано відповідно до вимог чинних нормативних документів у галузі промислового будівництва (ДБН В.2.2-27:2025 «Промислові будівлі»). Прийняті планувальні рішення забезпечують раціональне використання виробничої площі, зручність експлуатації будівлі, безпечне пересування персоналу та можливість розміщення необхідного технологічного обладнання.

					ДП	Арк
						51
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Виробничий корпус запроектовано одноповерховим каркасного типу з єдиним внутрішнім виробничим простором без капітальних перегородок у зоні розташування основного обладнання. Таке рішення забезпечує вільне компонування технологічної лінії, зручність проведення монтажних і ремонтних робіт, а також можливість подальшої модернізації виробництва. Для обслуговування висотних апаратів передбачено влаштування відкритих металевих технологічних етажерок та майданчиків обслуговування.

У плані будівля має прямокутну форму з габаритними розмірами 72,0 × 12,0 м у крайніх координатних осях. Така конфігурація є простою, економічно доцільною та дозволяє ефективно використовувати виробничий простір при розміщенні обладнання і прокладанні інженерних комунікацій.

Компонування внутрішнього простору виконано на основі уніфікованої модульної системи. Сітка колон прийнята з кроком 6,0 м у поздовжньому напрямку та прольотом 12,0 м у поперечному напрямку. Зазначені параметри забезпечують достатню площу для розміщення технологічного обладнання, організації проходів для персоналу та виконання м монтажно - ремонтних робіт.

Висота приміщення від рівня чистої підлоги до низу несучих конструкцій покриття становить 20 м. Прийнята висота обумовлена необхідністю розміщення вертикальних апаратів технологічної схеми, зокрема абсорбційних колон, скрубєрів та мокрого електрофільтра, а також забезпеченням умов для їх монтажу, демонтажу та технічного обслуговування.

Для створення нормативних умов праці в будівлі передбачено поєднання природного та штучного освітлення. Природне освітлення здійснюється через віконні прорізи в зовнішніх стінах будівлі. Крім освітлення, вони забезпечують природну аерацію приміщення, що сприяє підтриманню нормативних параметрів повітряного середовища.

Для забезпечення безпечної експлуатації споруди передбачено необхідну кількість евакуаційних виходів, дверей та воріт. Їх розміщення

					ДП	Арк
						52
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

прийнято з урахуванням вимог пожежної безпеки, шляхів евакуації та можливості транспортування технологічного обладнання під час монтажних і ремонтних робіт.

5.2 Конструктивне вирішення будівлі

Конструктивна схема виробничого корпусу прийнята каркасною із застосуванням збірних залізобетонних конструкцій. Таке рішення забезпечує необхідну міцність, надійність та довговічність споруди, а також дозволяє ефективно розмістити технологічне обладнання.

Фундаменти будівлі прийняті комбінованого типу. Під основні несучі колони каркаса передбачені залізобетонні стовпові фундаменти, які сприймають навантаження від несучих конструкцій та технологічного обладнання. Під зовнішні стіни будівлі влаштовані стрічкові залізобетонні фундаменти, що забезпечують рівномірну передачу навантажень на основу та стійкість огорожувальних конструкцій.

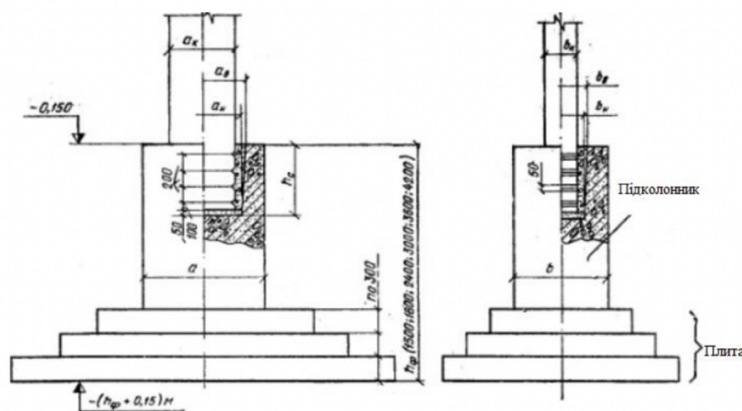


Рисунок 5.2.1. - Стовповий фундамент

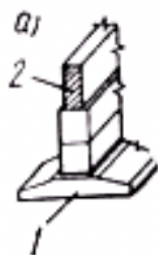


Рисунок 5.2.2. - підстінний стрічковий фундамент

					ДП	Арк
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		53

Несучий каркас будівлі утворений збірними залізобетонними колонами прямокутного перерізу 400×600 мм. Колони сприймають навантаження від покриття та передають його на фундаменти. Для кріплення стінових огорожень передбачені колони фахверку перерізом 400×400 мм. Просторова жорсткість і стійкість будівлі забезпечуються спільною роботою колон, елементів покриття та фахверкових конструкцій, що утворюють єдину несучу систему каркаса.

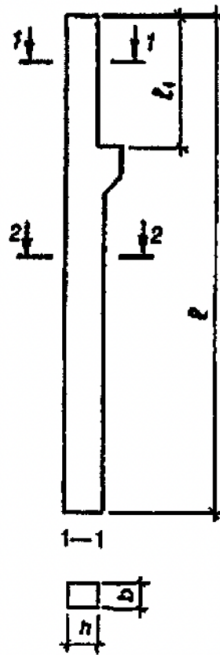


Рисунок 5.2.3. - Колона

Покриття будівлі виконано зі збірних залізобетонних балок та ребристих залізобетонних плит розміром 6×3 м і висотою 400 мм. Конструкція покриття включає пароізоляційний шар із бітумних матеріалів, теплоізоляцію з керамзитобетону товщиною 60 мм, цементну стяжку товщиною 20 мм, гідроізоляційний шар із руберойду на бітумній мастиці та захисний шар із бітуму і гравію. Прийняте конструктивне рішення забезпечує надійний захист приміщення від впливу атмосферних факторів та сприяє підтриманню необхідного температурного режиму.

					ДП	Арк
						54
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

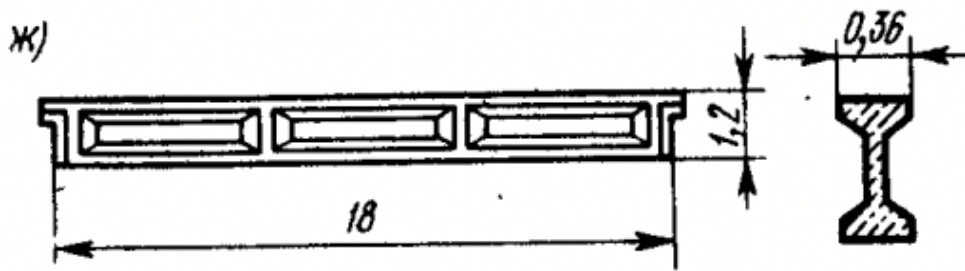


Рисунок 5.3.4. - Балка перекриття

Підлога виробничих приміщень складається з підготовчого шару ущільненого щебеню товщиною 400 мм, шару бітумної мастики товщиною 10 мм та асфальтобетонного покриття товщиною 90 мм. Така конструкція характеризується достатньою міцністю, зносостійкістю та стійкістю до експлуатаційних навантажень.

Для забезпечення доступу персоналу до виробничих приміщень передбачені зовнішні двері розміром 1500×2300 мм. Для транспортування обладнання, матеріалів та проведення монтажних робіт у будівлі встановлені ворота розміром 3000×3000 мм. Допоміжні приміщення м мають двері розміром 900×2300 мм.

Природне освітлення виробничих приміщень забезпечується через віконні прорізи розміром 1140×3000 мм, розташовані у зовнішніх стінах будівлі. Прийняті розміри та розташування вікон забезпечують достатнє надходження природного світла та створюють комфортні умови праці для персоналу.

Зовнішні стіни будівлі виконують огорожувальну функцію та спираються на стрічкові фундаменти і елементи фахверкового каркаса. Конструктивне рішення стін забезпечує необхідну міцність, довговічність та захист внутрішнього простору від впливу зовнішніх кліматичних факторів.

5.3 Розміщення споруд на плані

Розташування споруд і технологічного обладнання виконано відповідно до послідовності технологічного процесу, з урахуванням вимог безпечної експлуатації, зручності обслуговування та ремонту обладнання.

					ДП	Арк
						55
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Під час компонування установки також враховувалася необхідність скорочення довжини технологічних комунікацій і забезпечення вільного доступу до основних апаратів та допоміжних вузлів. Основне обладнання системи очищення нітрозних газів розміщене у виробничому корпусі, тоді як частина допоміжних споруд винесена на відкритий майданчик.

Технологічна лінія побудована за послідовним принципом руху газового потоку через усі стадії очищення. Після надходження до установки газу спрямовуються до холодильника, де відбувається їх попереднє охолодження перед подальшою обробкою. Холодильник встановлено на відмітці +0,5 м від рівня підлоги.

Після охолодження газовий потік надходить до газгольдера об'ємом 605 м³, який розташований на відкритому майданчику на відстані близько 6 м від зовнішньої стіни виробничого корпусу. Газгольдер виконує функцію буферної ємності, забезпечуючи вирівнювання коливань витрати газу та більш стабільну роботу всієї установки.

Далі газ подається до доокиснювача, встановленого на відмітці +1,0 м. У цьому апараті відбувається додаткове окиснення монооксиду нітрогену до діоксиду нітрогену, що підвищує ефективність наступних стадій абсорбційного очищення. Відстань між холодильником і доокиснювачем становить приблизно 3 м.

Після доокиснювача газ надходить до першого скрубера, у якому як зрошувальна рідина використовується азотна кислота. Апарат встановлено на металевій опорній конструкції з відміткою низу +2,0 м. Загальна висота скрубера становить 13 м. Безпосередньо під апаратом розміщено бак циркуляційної кислоти об'ємом 220 м³, з якого здійснюється подача зрошувальної рідини в систему. Відстань між доокиснювачем і першим скруберам прийнята рівною 3 м.

Другий і третій скрубери призначені для подальшого очищення газів шляхом промивання водою. Обидва апарати мають висоту 13 м та встановлені на відмітці +2,0 м. Під кожним скруберам розташовано бак

					ДП	Арк
						56
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

циркуляційної води об'ємом 205 м³. Відстань між сусідніми скруберами становить близько 3 м, що забезпечує достатній простір для розміщення трубопроводів, арматури, контрольно-вимірювальних приладів і проведення ремонтних робіт.

Після завершення абсорбційного очищення газовий потік надходить до мокрого електрофільтра висотою 13,3 м, який також встановлено на відмітці +2,0 м. Відстань між третім скруберам і електрофільтром становить 4 м. Призначення електрофільтра полягає в уловлюванні дрібнодисперсних аерозолів і краплин азотної кислоти, що можуть залишатися в газовому потоці після проходження скрубів.

Усе основне обладнання розташоване вздовж поздовжньої осі виробничого корпусу, що забезпечує логічну послідовність технологічного процесу та спрощує прокладання комунікацій. Між апаратами передбачені проходи шириною не менше 2 м для проведення оглядів, технічного обслуговування та ремонтних робіт. Прийняте компонування дозволяє забезпечити компактне розміщення обладнання, зручність експлуатації установки та дотримання вимог охорони праці й пожежної безпеки.

					ДП	Арк
						57
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Експлуатація промислової установки для вловлювання та нейтралізації нітрозних газів, що утворюються під час виробництва нітритних каталізаторів, супроводжується підвищеними ризиками для обслуговуючого персоналу. Специфіка роботи цього комплексу обладнання - який об'єднує теплообмінні апарати, реактор-доокиснювач, абсорбційні колони, насосні агрегати та розгалужену систему трубопроводів - вимагає безперервного контролю герметичності, чіткого моніторингу технологічних параметрів та справності рухомих механізмів.

Забезпечення безпечних умов праці на такій ділянці є важливим завданням, оскільки персонал безпосередньо взаємодіє з агресивним хімічним середовищем високих концентрацій. У дипломному проєкті на тему «Розробка технології утилізації нітрозних газів виробництва каталізаторів» розглядається система очищення газових викидів, обслуговування якої здійснюється у виробничому приміщенні площею 864 м³.

6.1 Повітря робочої зони

Одним із найбільш небезпечних виробничих факторів на ділянці очищення є можливість потрапляння оксидів азоту в повітря робочої зони. Нітрозні гази, зокрема NO та NO₂, є токсичними речовинами подразнювальної дії, які негативно впливають насамперед на органи дихання, слизові оболонки очей та шкіру.

Найбільший ризик виникає в місцях проходження газового потоку через абсорбційне обладнання, мокрий електрофільтр, трубопроводи, фланцеві з'єднання, а також у вузлах підведення та відведення газу. Імовірність локального забруднення повітря може зростати під час запуску установки, зупинки обладнання, проведення ремонтних робіт або при порушенні герметичності апаратів. (тут потрібно додати нормативи)

					ДП	Арк
						58
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Таблиця 6.1.1 - санітарно-гігієнічних вимогах до промислових приміщень:

Параметр контролю / Шкідлива речовина	Нормативне значення (ГДК або ОБУВ)	Клас небезпеки речовини	Особливості дії на організм та вимоги до контролю
Оксиди азоту (у перерахунку на NO ₂)	2 мг/м ³	3 клас (помірно небезпечні)	Гостра дія на дихальні шляхи, подразнювальний газ. Контроль щозміни.
Азотна кислота (HNO ₃)	2 мг/м ³	3 клас (помірно небезпечні)	Пари викликають хімічні опіки слизових оболонок. Вимагає безперервного моніторингу.
Озон O ₃	0,1 мг/м ³	1 клас (надзвичайно небезпечні)	Сильний окисник, токсичний. Потрібні датчики витоку біля фільтра.
Температура повітря (для теплого періоду / категорія робіт Пб)	18 - 27 С	—	Оптимальні параметри мікроклімату для робіт середньої важкості.
Відносна вологість повітря	40 - 75 %	—	Регламентується для забезпечення нормального теплообміну працівників.
Швидкість руху повітря	Не більше 0,3 м/с	—	Запобігає утворенню протягів при одночасній роботі припливної вентиляції.

Вміст кисню (O ₂) у повітрі	Не менше 19,5 - 20 %	—	Критичний показник для запобігання асфіксії (задухи) при витоках нітрозних газів.
---	----------------------	---	---

Для підтримання нормативних санітарно-гігієнічних умов на виробничій ділянці передбачають:

- постійний контроль стану повітряного середовища в робочій зоні;
- контроль герметичності апаратів, газоходів, насосів та фланцевих з'єднань;
- обладнання місцевої витяжної вентиляції біля насосного обладнання та потенційних місць виділення газів;
- застосування автоматичних газоаналізаторів для безперервного контролю концентрації оксидів азоту;
- аварійну вентиляцію при перевищенні допустимих концентрацій шкідливих речовин.

Концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати гранично допустимих значень відповідно до вимог чинних санітарних норм.

Для захисту персоналу під час обслуговування обладнання, проведення ремонтних або аварійних робіт застосовуються засоби індивідуального захисту органів дихання - фільтруючі протигази або респіратори, стійкі до впливу кислотних газів.

6.2 Електробезпека

Важливим питанням охорони праці на установці очищення нітрозних газів є забезпечення електробезпеки під час експлуатації електроприводів насосів, мокрого електрофільтра, контрольно-вимірювальних приладів та засобів автоматизації.

					ДП	Арк
						60
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Особливістю технологічної схеми є поєднання електрообладнання з вологим середовищем та агресивними рідинами, зокрема азотною кислотою. У таких умовах зростає ризик пошкодження ізоляції, виникнення струмопровідних нашарувань на обладнанні та можливого ураження персоналу електричним струмом.

З метою забезпечення безпечної експлуатації передбачаються:

- захисне заземлення та занулення всіх металевих неструмовідних частин обладнання;
- використання електрообладнання у хімічно стійкому та вологозахищеному виконанні;
- герметичне виконання електротехнічних шаф і з'єднувальних коробок;
- захист електромереж автоматичними вимикачами та пристроями аварійного відключення;
- періодична перевірка опору ізоляції кабельних мереж;
- регулярний огляд стану електропроводки, контактних з'єднань та заземлювальних пристроїв.

Обслуговування електрообладнання повинно проводитися тільки спеціально підготовленим персоналом із відповідною групою допуску з електробезпеки.

Під час виконання ремонтних робіт працівники повинні використовувати діелектричні рукавиці, захисне взуття та ізолюючий інструмент.

6.3 Пожежна безпека

Попри те, що технологічний процес очищення нітрозних газів не пов'язаний безпосередньо з використанням горючих газів, питання пожежної безпеки залишається актуальним через сильні окиснювальні властивості оксидів азоту та наявність підвищених температур на окремих стадіях процесу.

					ДП	Арк
						61
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

Оксиди азоту здатні активно вступати в реакцію з деякими органічними речовинами, мастильними матеріалами та забрудненнями на поверхнях обладнання. За несприятливих умов це може призвести до локального перегріву або займання.

Підвищену увагу приділяють контролю температурного режиму в зоні надходження гарячих газів, у реакторі-доокиснювачі, теплообмінному обладнанні та газоходах.

Оскільки технологічний процес очищення розпочинається з обробки гарячих нітрозних газів, які далі охолоджуються, виробниче приміщення за пожежною безпекою відноситься до категорії Г. Відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 категорія приміщення визначається за найбільш несприятливими умовами технологічного процесу. Додаткову пожежну безпеку створює мокрий електрофільтр, робота якого пов'язана з використанням високої напруги.

Для забезпечення пожежної безпеки виробничого приміщення площею 864 м² передбачається оснащення його первинними засобами пожежогасіння. З урахуванням площі та конфігурації приміщення встановлюються не менше чотирьох переносних порошкових вогнегасників типу ВП-9 із масою вогнегасної речовини 9 кг. Вогнегасники розміщують рівномірно по периметру приміщення таким чином, щоб відстань від будь - якого робочого місця до найближчого засобу пожежогасіння не перевищувала 40 м.

У місцях розташування обладнання підвищеної пожежної безпеки, зокрема біля мокрого електрофільтра, насосного обладнання та щитів керування, додатково встановлюються вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-5. Для забезпечення пожежної безпеки передбачають:

- недопущення контакту газових потоків з легкозаймистими матеріалами;
- контроль температури технологічного середовища та поверхонь обладнання;
- регулярне очищення обладнання від відкладень;

					ДП	Арк
						62
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

- використання негорючих конструкційних і теплоізоляційних матеріалів;
- контроль стану ущільнень та запірної арматури;
- забезпечення ділянки первинними засобами пожежогасіння;
- вільний доступ до евакуаційних проходів та пожежного інвентарю.

У виробничих приміщеннях встановлюються порошкові або вуглекислотні вогнегасники, а персонал проходить інструктаж з пожежної безпеки та порядку дій у разі аварійної ситуації. (тут написати про категорію, клас, документи нормативні і про вогнегасники)

6.4 Виробничий шум та вібрація

Під час роботи установки очищення нітрозних газів джерелами шуму є насосне обладнання для подачі поглинального розчину, газодувки, компресори, електродвигуни, а також рух газових потоків трубопроводами та апаратами.

Оскільки основна частина обладнання працює безперервно, шумове навантаження може мати постійний характер і негативно впливати на працездатність персоналу, викликати втому, зниження концентрації уваги та погіршення умов праці.

Крім шуму, робота насосів і компресорів супроводжується механічною вібрацією, яка передається через фундаментні конструкції, трубопроводи та опорні елементи.

Для зниження шумового й вібраційного впливу застосовуються:

- встановлення насосного та компресорного обладнання на вібропоглинальні опори;
- монтаж гнучких вставок на трубопроводах;
- використання шумопоглинальних кожухів;
- звукоізоляція окремих технологічних вузлів;
- планове технічне обслуговування обертових механізмів для попередження розбалансування;

					ДП	Арк
						63
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

- контроль рівнів шуму в робочій зоні.

Фактичний рівень шуму від роботи насосів, газодувок та компресорів в установках очищення нітрозних газів сягає 85–98 дБА, що на 5–18 дБА перевищує допустимий норматив у 80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99). Окрім інженерних заходів (віброопори, кожухи), для гарантування безпеки праці персонал обов'язково забезпечується засобами індивідуального захисту слуху (наушники, вкладиші) з коефіцієнтом зниження шуму (SNR) не менше 25–30 дБ. Прикладом базового та доступного індивідуального захисту є складні захисні наушники Dnipro-M серії Profi, які забезпечують зниження рівня шуму на SNR: 33 дБ.

					ДП	Арк
						64
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті представлено розробку технологічної схеми утилізації нітрозних газів, які утворюються в процесі термічного розкладу нітратних прекурсорів при виробництві гетерогенних каталізаторів. Спираючись на аналіз сучасних методів очищення газових викидів, обґрунтовано доцільність впровадження технологічної схеми. Ця схема включає етапи додаткового окиснення оксидів азоту, абсорбційного очищення та кінцевого уловлювання кислотного туману за допомогою мокрого електрофільтра. У результаті використання запропонованого підходу досягається висока ефективність очищення газів, а також забезпечується можливість одержання розведеної азотної кислоти як корисного побічного продукту.

Для реалізації зазначеної технології виконано технологічні та конструктивні розрахунки основного обладнання установки: холодильників, скрубєрів та мокрого електрофільтра. У ході розрахунків визначено основні геометричні характеристики та робочі параметри обладнання, необхідні для забезпечення його ефективної експлуатації.

У рамках будівельного розділу проєкту розроблено об'ємно - планувальне рішення виробничого корпусу та виконано компоновання технологічного обладнання з урахуванням вимог чинних будівельних норм, особливостей технологічного процесу та безпечної експлуатації.

У розділі охорони праці проведено аналіз потенційних небезпечних і шкідливих виробничих факторів та розроблено комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці персоналу.

Отримані результати підтверджують технічну та екологічну доцільність впровадження розробленої технологічної схеми очищення нітрозних газів. Її застосування дозволить знизити негативний вплив виробництва каталізаторів на навколишнє середовище та підвищити ефективність використання ресурсів.

					ДП	Арк
						65
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chorkendorff I., Niemantsverdriet J. W. *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics*. Weinheim : Wiley-VCH, 2017. 484 p.
2. Akhtar M. S., Ali S., Zaman W. Recent Advancements in Catalysts for Petroleum Refining // *Catalysts*. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 841.
3. Gao F., Tang X., Yi H. et al. Advances in Selective Catalytic Oxidation of Ammonia (NH₃-SCO) to Dinitrogen in Excess Oxygen: A Review on Typical Catalysts, Catalytic Performances and Reaction Mechanisms // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 1. Art. 104575.
4. Hagen J. *Industrial Catalysis: A Practical Approach*. 3rd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2015. 518 p.
5. *Preparation of Catalysts V: Scientific Bases for the Preparation of Heterogeneous Catalysts* / ed. by B. Delmon, P. Grange, P. A. Jacobs, G. Poncelet. Amsterdam : Elsevier, 1991. 747 p. (Studies in Surface Science and Catalysis; Vol. 63).
6. Groen G., Ferment J., Groeneveld M. J., Decler J., Delva A. Scaling Down of the Calcination Process for Industrial Catalyst Manufacturing // *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1991. Vol. 63. P. 185–203.
7. Industrial Application of Catalysts for Offgas Treatment // *Studies in Surface Science and Catalysis*. Amsterdam : Elsevier, 1991. P. 55–74.
8. Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J. (Eds.). *Preparation of Solid Catalysts*. Weinheim : Wiley-VCH, 1999.
9. Perego C., Villa P. Catalyst Preparation Methods // *Catalysis Today*. 1997. Vol. 34. P. 281–305.
10. Munnik P., de Jongh P. E., de Jong K. P. Recent Developments in the Synthesis of Supported Catalysts // *Chemical Reviews*. 2015. Vol. 115, No. 14. P. 6687–6718.
11. Schwarz J. A., Contescu C., Contescu A. Methods for Preparation of Catalytic Materials // *Chemical Reviews*. 1995. Vol. 95, No. 3. P. 477–510.

					ДП	Арк
						66
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

- 12.Varma A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Manukyan K. V. Solution Combustion Synthesis of Nanoscale Materials // *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 23. P. 14493–14586.
- 13.Трипольський А. І., Фатєєв Д. С., П'яних К. Є. та ін. Розробка каталізатору синтезу компонентів моторного палива з вуглецьвмісної сировини.
- 14.*Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. Volume 11. Nitrogen Oxides: Acute Exposure Guideline Levels*. Washington, DC : National Academies Press, 2012.
- 15.Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 52 від 14.01.2020 р. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text>
- 16.Wang D., Wu Y., Li J. et al. Multipollutant Control (MPC) of Flue Gas from Stationary Sources Using SCR Technology: A Critical Review // *Environmental Science & Technology*. 2021. Vol. 55, No. 5. P. 2743–2766.
- 17.Capała P., Ruszak M., Rudawska A., Inger M., Wilk M. The Technology of Tail Gases Purifying in Nitric Acid Plants and Design of deN₂O and deNO_x Reactors—Review // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Art. 7492.
- 18.Thiemann M., Scheibler E., Wiegand K. W. Nitric Acid, Nitrous Acid, and Nitrogen Oxides // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim : Wiley-VCH, 2000.
- 19.Корнієнко Я. М., Степанюк А. Р., Гулієнко С. В. та ін. *Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 1 : практикум : навч. посіб.* Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 468 с.
- 20.Experimental Investigation of the Flow at the Entrance of a Rotodynamic Multiphase Pump by Visualization. Structure of Buffer Tank. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-buffer-tank-1-Cover-of-the-upper-part-2-Upper-inner-cover-3-Lower_fig1_270293318
- 21.Іваненко О. І. *Методичні вказівки до виконання курсових проектів з курсу «Технологія та обладнання захисту атмосфери» для студентів спеціальності 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»*. Київ : ТОВ «Інфодрук», 2012. 107 с.

					ДП	Арк
						67
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ДОДАТОК А

[illegible]

ДП 2115.01.000 ТК

Зм.	Арк.	№Докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Гудзенко К.В.			Технологічна схема	Літ.		Аркуш	Аркушів
Перев.		Іваненко. О.І.						68	72
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФАПІЕ, ЛЕ-21			
Н.Конт.									
Затв.		Іваненко О.І.							

					ДП	Арк
						68
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ДОДАТОК Б

[illegible]

ДП 2115.01.000 ТК

Зм.	Арк.	№Докум.	Підпис	Дата											
Розроб.		Гудзенко К.В.			Технологічна схема					Літ.		Аркуш	Аркушів		
Перев.		Іваненко. О.І.											69	72	
										КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФАПІЕ, ЛЕ-21					
Н.Конт.															
Затв.		Іваненко О.І.													

					ДП	Арк
						69
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ДОДАТОК В

[illegible]

ДП 2115.01.000 ТК

Зм.	Арк.	№Докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Гудзенко К.В.			Технологічна схема	Літ.		Аркуш	Аркушів
Перев.		Іваненко. О.І.						70	72
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФАПІЕ, ЛЕ-21			
Н.Конт.									
Затв.		Іваненко О.І.							

					ДП	Арк
						70
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ДОДАТОК Г

[illegible]

					ДП	Арк
						71
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		

ДОДАТОК Д

[illegible]

ДП 2115.01.000 ТК

Зм.	Арк.	№Докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Гудзенко К.В.			Технологічна схема	Літ.		Аркуш	Аркушів
Перев.		Іваненко. О.І.						72	72
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФАПІЕ, ЛЕ-21			
Н.Конт.									
Затв.		Іваненко О.І.							

					ДП	Арк
						72
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дат		