

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри

підпис, дата

Кваліфікаційна робота магістра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
освітня програма "Обладнання хімічних виробництв
і підприємств будівельних матеріалів"

Тема роботи: Аміачна парокompресійна установка.
Розробити та модернізувати апарат повітряного
охолодження

Виконала:
студентка групи ХМ.мдн-22с
Гарагуля Дар'я Романівна

підпис

Залікова книжка
№ _____

Кваліфікаційна робота магістра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

" ____ " _____ 20__ р.

Підпис голови
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Острога Руслан Олексійович

підпис, дата

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	6
1.1 Особливості повітряного охолодження	6
1.2 Режимно-технологічні особливості холодильних установок	8
1.3 Теоретичні основи теплообмінних процесів	11
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	21
2.1 Опис технологічної схеми аміачної парокомпресійної установки	21
2.2 Опис конструкції проектного апарата	23
2.3 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата	26
2.4 Гідравлічні розрахунки	35
2.5 Вибір допоміжного обладнання	37
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	39
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	39
3.2 Розрахунки на міцність та стійкість	41
4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА	46
4.1 Обґрунтування компоновки основного та допоміжного обладнання	46
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	51
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	56
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	56
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	58
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	63

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**69****ДОДАТКИ. Специфікації до графічної частини проєкту**

ВСТУП

Процеси охолодження відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки та якості продуктів в різних галузях. Існують різні методи охолодження, які використовуються для збереження продуктів при низьких температурах [1]:

1. *Холодильники та морозильники.* Одним із найпоширеніших методів є використання компресорів, які стискають і розширюють холодоагент, створюючи тим самим холод. Абсорбційне охолодження використовує розчин абсорбенту та парогенератора для створення холоду.

2. *Кріоконсервація* – використання дуже низьких температур (наприклад, рідкий азот або сухий лід) для заморожування продуктів для подовження їхнього терміну зберігання.

3. *Кріогенне охолодження* – використання кріогенних рідин, таких як рідкий азот чи гелій, для створення дуже низьких температур.

4. *Вакуумне охолодження* – використовує вакуум для зниження температури води, що призводить до швидкого охолодження продуктів.

5. *Інфрачервоне охолодження* – використовує випромінювання інфрачервоного випромінювання для охолодження поверхонь продуктів.

Ці методи використовуються в залежності від конкретних потреб та властивостей продуктів. Охолодження допомагає зберегти свіжість та якість продуктів, запобігти розпаду та збільшити їхній термін придатності для споживання.

Холодильні установки можна поділити за рівнем температури охолодження на дві основні категорії: холодильники і морозильники. Кожна з цих категорій призначена для зберігання продуктів при певних температурних умовах [1–5].

Холодильники призначені для зберігання продуктів при температурі від приблизно 0°C до +7°C. Використовуються для охолодження продуктів, які не потребують заморожування, але вимагають низьких температур для збереження свіжості.

Морозильники призначені для заморожування і зберігання продуктів при дуже низьких температурах, часто менше -18°C . Застосовуються для тривалого зберігання продуктів, таких як м'ясо, риба, овочі та готові обіди.

Ці дві категорії використовують різні технології для досягнення і утримання відповідних температур. Компресійне охолодження є однією з основних технологій для холодильників та морозильників, а абсорбційне охолодження також може застосовуватися в деяких випадках. Важливо враховувати вимоги до температурного режиму в залежності від конкретного типу продуктів, які потрібно зберігати.

У даній кваліфікаційній роботі [6] досліджено принцип роботи аміачної парокомпресійної установки та запроектовано апарат повітряного охолодження.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Особливості повітряного охолодження [1, 5, 7]

Повітряне охолодження – це процес вилучення тепла з речовини або середовища за допомогою повітря. Цей метод охолодження використовується в різних галузях, включаючи промисловість, кондиціонування повітря та холодильні системи.

У повітряному охолодженні теплообмін відбувається між робочою речовиною (наприклад, рідиною чи газом) і повітрям. Тепло передається від гарячої речовини до повітря через конденсацію, випаровування або конвекцію. При цьому використовують різні охолоджувальні агенти, такі як вода, гази чи холодоносії. Вода є одним з найбільш поширених охолоджувальних агентів у системах охолодження.

Існує декілька видів систем повітряного охолодження, включаючи відкриті системи охолодження, системи замкнутого циклу і вентиляційні системи з охолоджувальним обладнанням.

Розглянемо види обладнання:

1. Охолоджувальні вежі використовуються для відведення тепла від промислових процесів або кондиціонування.
2. Кондиціонери використовуються для охолодження повітря в житлових та комерційних приміщеннях.

Ефективність повітряного охолодження може залежати від умов навколишнього середовища, вологості повітря та характеристик охолоджувальних систем. Особливості дизайну та вартість утримання також важливі при виборі системи. Повітряне охолодження використовується як ефективний спосіб контролю температури в різних галузях, сприяючи збереженню працездатності технологічного обладнання.

Холодильні установки використовують зворотні цикли, що дозволяє їм відбирати тепло з низькотемпературного джерела (холодного середовища) і

віддавати його до вищотемпературного джерела (гарячого середовища), використовуючи роботу стиснення і розширення холодильного агента.

Однак є важливим враховувати, що холодильні установки не створюють холод, а лише переміщують тепло від низькотемпературного середовища до вищотемпературного. Робота, яка виконується під час стиснення газу (витрату енергії), дозволяє відбирати тепло з холодного середовища, а розширення газу дозволяє віддавати це тепло до гарячого середовища.

Цикл Карно визначає теоретичний максимум ефективності холодильного процесу при заданих температурах гарячого і холодного джерел. Хоча ідеальний цикл Карно не може бути досягнутий в реальних системах через різноманітні термодинамічні та технічні обмеження, він служить важливим пунктом визначення ефективності реальних холодильних систем.

Цикл Карно використовує чотири етапи:

1. Ізотермічне розширення – робоча речовина нагрівається при низькій температурі, приймаючи тепло від холодного джерела. Цей етап відбувається при постійній температурі.

2. Адіабатичне розширення – робоча речовина розширюється адіабатично (без обміну теплом з оточуючим середовищем), виконуючи роботу за рахунок свого внутрішнього енергетичного резерву.

3. Ізотермічне стискання – робоча речовина віддає тепло верхньому (гарячому) джерелу, стискаючись при постійній температурі.

4. Адіабатичне стискання – робоча речовина стискається адіабатично, виконуючи роботу над оточуючим середовищем.

У якості холодильних агентів для парокомпресійних холодильних установок можуть використовуватися різні речовини чи їх суміші, враховуючи обмеження температури кипіння при атмосферному тиску, що не перевищує 0°C . Декілька холодильних агентів, які можуть задовольняти цю умову, включають:

Аміак (NH_3): температура кипіння -33.34°C при атмосферному тиску. Аміак відомий своєю високою теплозабезпечуючою здатністю та ефективністю в холодильних системах. Використовується в промисловості та комерції.

Фреони (наприклад, R134a): температура кипіння -26.1°C при атмосферному тиску. Фреони були широко використовувані як холодильні агенти, але кілька з них були визнані шкідливими для озонового шару, і їх використання зменшується на користь більш екологічно безпечних альтернатив.

Пропан (R290): температура кипіння -42.07°C при атмосферному тиску. Пропан є природним холодильним агентом та відзначається високою ефективністю. Використовується в певних холодильних системах.

Бутан (R600a): температура кипіння -0.5°C при атмосферному тиску. Бутан також є природним холодильним агентом і використовується в певних домашніх холодильниках та морозильниках.

Важливо враховувати технічні, економічні та екологічні аспекти при виборі холодильного агента для конкретної системи. Розвиток нових, більш екологічно безпечних альтернатив стає важливим напрямком у галузі охолодження.

1.2 Режимно-технологічні особливості холодильних установок [1, 2, 7]

Критична температура холодильного агента є ключовою характеристикою, яка визначає його можливість функціонувати в конкретних умовах. Критична температура є показником того, при якій температурі тиск та щільність холодильного агента стають критичними, і відбувається перехід між газоподібним та рідким станом без будь-якого відмітного розділення між ними.

Щоб забезпечити ефективне охолодження, критична температура повинна бути достатньо високою, щоб холодильний агент міг конденсуватися при вищих температурах, забезпечуючи ефективний теплообмін. Якщо критична температура занадто низька, це може обмежити можливість використання холодильного агента при високих температурах навколишнього середовища.

Наприклад, аміак (NH_3), який є широко використовуваним холодильним агентом, має високу критичну температуру (-33.34°C), що дозволяє йому ефективно конденсуватися при високих температурах. Це робить його ефективним для промислових та комерційних холодильних систем.

При виборі холодильного агента важливо ретельно вивчити його фізичні властивості, включаючи критичну температуру, аби забезпечити оптимальне функціонування системи та забезпечити безпеку та ефективність.

Теплота випаровування (теплота пароутворення) – це кількість тепла, яка необхідна для переходу одного кількісного об'єму речовини з рідкого в газоподібний стан при сталому тиску і температурі. Велика теплота випаровування при низьких температурах важлива для ефективного охолодження, оскільки це означає, що холодильний агент може вилучати багато тепла з оточуючого середовища при випаровуванні. Це особливо важливо в холодильних системах для зберігання продуктів чи в медичних холодильниках.

Велика теплота випаровування дозволяє зменшити кількість холодоагента, який циркулює в системі. Менша кількість холодоагента може призвести до зменшення розмірів холодильної машини при збереженні заданої холодопродуктивності, що є важливим для ефективності та економічності системи.

Густина пари холодильного агента визначає кількість маси пари, яка може займати певний об'єм при заданій температурі та тиску. Більша густина

пари означає, що можна вмістити більше маси холодильного агента при заданому об'ємі, що важливо для ефективності роботи холодильної системи.

Розуміння цих характеристик допомагає інженерам і проектувальникам вибрати оптимальні холодильні агенти для конкретних застосувань та максимізувати ефективність систем охолодження.

Низький тиск пари призводить до кількох важливих переваг:

1. Механічна міцність. Помірний тиск пари дозволяє зменшити навантаження на елементи холодильної установки, такі як конденсатори, трубопроводи та компресори. Зменшення механічного напруження сприяє збільшенню міцності та тривалості служби обладнання.

2. Витрати матеріалів. Зниження тиску дозволяє зменшити потребу в металевих матеріалах для виготовлення елементів системи. Це може вплинути на вартість виготовлення та загальну масу обладнання.

3. Енергоефективність. Помірний тиск пари під час конденсації може зменшити витрати енергії, пов'язані з роботою компресора та інших компонентів системи. Зниження тиску під час конденсації може покращити тепловий обмін та ефективність холодильного циклу.

4. Вартість та ефективність. Зменшення витрат на матеріали і енергію може призвести до зниження вартості виробництва та підвищення ефективності системи.

Підтримка трохи вищого тиску у випарнику в контексті виявлення та обслуговування систем холодильних установок. По-перше, виявлення нещільностей та витоків. Підвищений тиск у випарнику може робити більш помітними будь-які нещільності або місця витoku пари холодоагента. Це полегшує виявлення потенційних проблем, таких як витoki, що може бути важливо для запобігання втрати холодильного агента та забезпечення ефективності системи.

Підтримка трохи вищого тиску у випарнику може допомогти уникнути всмоктування атмосферного повітря у систему в разі витoku. Всмоктування

атмосферного повітря може призвести до зниження ефективності та негативно вплинути на роботу компресора та інших компонентів.

Для забезпечення підтримки вищого тиску може знадобитися додаткове обладнання, таке як клапани, регулювальні пристрої та системи контролю. Це може підвищити вартість системи, але забезпечить більш високий рівень контролю та надійності.

Обрання оптимального рівня тиску враховує компроміс між перевагами виявлення проблем та ефективністю системи, а також витратами на додаткове обладнання. Забезпечення правильного тиску у випарнику є важливою частиною налаштування та обслуговування холодильних установок для їх ефективної та безпечної роботи.

1.3 Теоретичні основи теплообмінних процесів [8]

У конденсаторах основним завданням процесу є конденсація газу, при цьому відбувається процес фазового переходу гарячого теплоносія та одержання рідини за рахунок передачі тепла від гарячого теплоносія до холодного та нагрівання останнього. Залежно від розміщення теплообмінної поверхні розрізняють апарати повітряного охолодження: горизонтальні АПГ, вертикальні АПВ, малопотокові АПМ, зигзагоподібні АПЗ.

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

- кількість переданого тепла;
- термодинамічні параметри (температури, тиски, обсяги та агрегатні стани теплоносіїв);
- фізико-хімічні властивості (щільність, в'язкість тощо);
- агресивність теплоносіїв до конструкційного матеріалу;
- ступінь забрудненості теплоносія та характер відкладень;
- властивості конструкційного матеріалу;
- призначення апарату та процеси, які у ньому протікають;

– напруги, що виникають як в результаті дії тиску теплоносіїв, так і різниці теплових подовжень різних частин теплообмінника і статичний напір, що викликаний теплоносієм.

Кількість тепла, що передається, є основою для визначення величини поверхні теплообміну. Воно дає конструктору непряму вказівку та на вибір конструкції теплообмінника.

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

Коефіцієнт теплопередачі вимірює кількість тепла, що передається від одного тіла до іншого в одиницю часу через одиницю поверхні при різниці температур між теплоносіями 1°C .

Температури теплоносіїв визначають середню різницю температур Δt_{cp} та поверхню теплообміну F , а також вибір току теплоносіїв.

Об'єми теплоносіїв визначають перерізи каналів теплообмінника, викликаючи застосування одно- або багатোধодових конструкцій. Агресивність теплоносіїв вимагає застосування тих чи інших конструкційних матеріалів, які визначають форму та конструкцію теплообмінника. Забрудненість теплоносіїв викликає застосування заходів, що перешкоджають відкладенню осаду, та вибір конструкції, що полегшує чищення забруднених поверхонь.

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

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

Основні співвідношення для теплообмінників. Вихідні дані визначення розмірів теплообмінника визначаються з теплового балансу

$$Q = G_1 \cdot \Delta i_1 = G_2 \cdot \Delta i_2,$$

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

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

Δi_1 і Δi_2 – зміна тепломістку теплоносіїв під час процесу теплопередачі, Дж/кг.

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

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

де t_1 і t_2 – температури теплоносія на вході та виході теплообмінника, К;
 c_p – середня теплоємність при температурі

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

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

$$\Delta i = c_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}) + \tau + c \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{ж}}), \quad \text{Дж/кг},$$

де $t_{\text{п}}$ і $t_{\text{ж}}$ – температури пари та рідини, К;

$t_{\text{н}}$ – температура насичення пари, К;

$c_{\text{п}}$ і $c_{\text{ж}}$ – середні теплоємності пари та рідини, Дж/(кг·К);

τ – теплота пароутворення, Дж/кг.

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

Тоді (як це часто вважають)

$$\Delta i = \tau.$$

Визначення поверхні теплообмінника проводиться за основним рівнянням теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{\Delta t_{\text{cp}} \cdot K},$$

де F – поверхня теплообміну, м^2 ;

Δt_{cp} – середня різниця температур, К ;

K – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

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

$$\Delta t_{\text{cp}} = t_{\text{конд}} - t_{\text{кип}}, \text{ К}.$$

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

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

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}},$$

де Δt_1 – більша різниця температур теплоносіїв біля одного кінця теплообмінника, К ;

Δt_2 – менша різниця температур теплоносіїв біля іншого кінця теплообмінника, К .

Якщо відношення $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \leq 2$, то з достатньою точністю у якості середньої різниці температур можна приймати середню арифметичну різницю

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}.$$

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

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

$$\Delta t'_{cp} = \varepsilon_T \cdot \Delta t_{cp},$$

де ε_T – поправочний коефіцієнт.

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

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

де α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від гріючого теплоносія до стінки і від стінки до теплоносія, що нагрівається., $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

s – товщина стінки, м;

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

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

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

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

Термічний опір багат шарової стінки дорівнює сумі опорів всіх шарів, тобто

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

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

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

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

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

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

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

Ця спрощена формула для визначення K зручна для грубих розрахунків.

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

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

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

Термічний опір стінки знижує K . Вплив термічного опору невеликий тільки в тих випадках, коли $\frac{s}{\lambda}$ є малим у порівнянні з $\frac{1}{\alpha_1}$ і $\frac{1}{\alpha_2}$. Може статися, що α_1 і α_2 є великими, скажімо при кипінні та конденсації, а труби зроблені з матеріалу з порівняно невеликою теплопровідністю, наприклад, з хромонікелієвої сталі ($\lambda=12$ Вт/(м²·К)), або з пластичної маси, або зроблені товстостінними. Тоді основним опором, що обмежує величину теплового навантаження, виявиться термічний опір стінки, і їм у жодному разі знехтувати вже не можна.

Для обчислення коефіцієнта тепловіддачі від теплоносія до внутрішніх стінок трубок використовується залежність:

$$\alpha_1 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_g}{d_{\text{вн}}} \cdot Re_g^{0,8} \cdot Pr_g^{0,4},$$

де λ_g – теплопровідність теплоносія, Вт/(м·К);

$d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр трубок, м;

Re_g – критерій Рейнольдса руху теплоносія по трубам;

Pr_g – критерій Прандтля руху теплоносія по трубам.

Для обчислення коефіцієнта тепловіддачі від оребреної поверхні трубок до повітря використовується залежність:

$$\alpha_2 = 0,223 \cdot k \cdot u^{0,33} \cdot h^{0,14} \cdot d_n^{-0,54} \cdot \left(\frac{W_{air} \cdot \rho_{air}}{\mu_{air}} \right)^{0,65},$$

де k – поправка на оребрення;

h – висота ребер труб, м;

u – крок між ребрами, м;

W_{air} – швидкість атмосферного повітря, м/с;

d_n – зовнішній діаметр трубок, м;

μ_{air} – динамічна в'язкість повітря, Па·с.

Основні критерії подібності, які застосовуються при розрахунках процесів конвективного теплообміну при вимушеному русі теплоносіїв, наведені нижче.

Критерій Нусельта характеризує теплообмін між теплоносієм і стінкою:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

l – визначальний геометричний розмір, м;

λ – теплопровідність теплоносія, Вт/(м·К).

Критерій Рейнольдса характеризує гідродинамічний режим руху теплоносія:

$$Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu},$$

де w – швидкість теплоносія, м/с;

ρ – густина теплоносія, кг/м³;

μ – динамічна в'язкість теплоносія, Па·с.

Критерій Прандтля характеризує теплофізичні властивості теплоносія:

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c}{\lambda},$$

де c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К).

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі при течії рідини в прямих трубах і каналах рекомендуються наступні критеріальні рівняння:

– для ламінарного режиму

$$Nu = 0,74 \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{0,2} \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,1},$$

де Gr – критерій Грасгофа, який характеризує режим руху теплоносія при вільній конвекції.

– для перехідного режиму

$$Nu = 0,008 \cdot \text{Re}^{0,9} \cdot \text{Pr}^{0,43};$$

– для турбулентного режиму

$$Nu = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3}.$$

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис технологічної схеми аміачної парокompресійної установки [8]

Холодильні машини і установки призначені для штучного зниження і підтримки низької температури нижче температури навколишнього середовища від 10°C і до -153°C в заданому охолоджуваному об'єкті. Відведення і перенесення теплоти здійснюється за рахунок споживаної при цьому енергії.

На великих холодильних установках у якості холодильного агенту широко застосовується аміак, який є одним із найбільш ефективних холодоагентів. Високі енергетичні показники, інтенсивність теплообміну при зміні агрегатного стану (конденсація, кипіння) забезпечили широке використання аміаку при вирішенні завдань холодопостачання великих підприємств із високою холодопродуктивністю.

Аміак відноситься до холодоагентів середнього тиску і використовується в найбільш затребуваному інтервалі температур об'єкта, що охолоджується, від 0 до -60°C при температурі конденсації до 55°C . Діапазон холодопродуктивності аміачних холодильних машин може становити від десятків кіловат до кількох мегават.

Особливу увагу слід приділяти забезпеченню безпеки експлуатації холодильних установок, які відпрацювали понад 20 років. Більшість існуючих аміачних холодильних установок (АХУ) потребує переозброєння, тому що обладнання фізично та морально застаріло, а також закінчуються ресурсні терміни експлуатації. Використання аміаку, як потенційно небезпечного газу, досить строго регламентується правилами безпеки аміачних холодильних установок (ПБ 09-595-03).

На рис. 2.1 представлено технологічну схему аміачної холодильної установки з апаратами повітряного охолодження у якості конденсаторів.

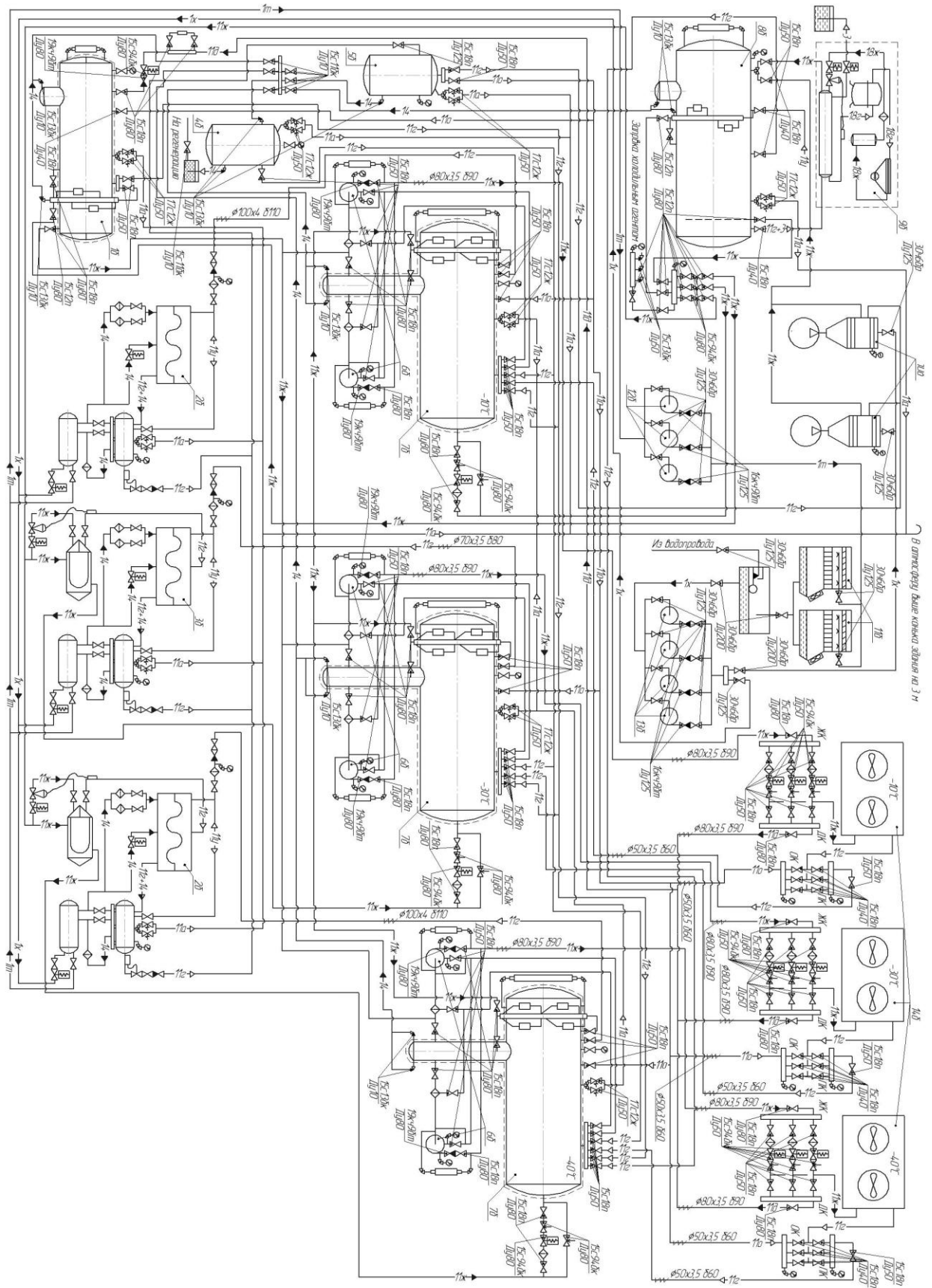


Рисунок 2.1 – Технологічна схема аміачної холодильної установки

Принцип роботи цієї установки полягає у наступному. Пари аміаку із випарників відсмоктуються компресорними агрегатами. Після чого вони надходять у конденсатори повітряного охолодження, де конденсуються, віддаючи тепло атмосферному повітрю. Далі, уже рідкий аміак, через дросельні пристрої спрямовується назад у випарники, де знову перетворюється на пару. Для запобігання усмоктування вологої пари, на лінії між випарником і компресорним агрегатом встановлено відокремлювачі рідини.

У потоці пари з компресора міститься значна кількість змащувача. У спеціальному масловіддільникові велика частина масла затримується і, накопичившись, повертається в картер компресорної машини. А автоматичний дросельний пристрій постійно забезпечує оптимальне заповнення випарника рідиною на рівні верхнього ряду трубного пучка.

2.2 Опис конструкції проектного апарата [8]

У проектованому апараті повітряного охолодження (рис. 2.2) охолоджуючим агентом є потік атмосферного повітря, яке нагнітається за допомогою вентилятора.

Принцип роботи даного апарату полягає у наступному. Потік повітря, який нагнітається вентилятором і обдуває горизонтальні трубні секції, конденсуючи при цьому пари аміаку, який рухається усередині трубного пучка. При високій температурі повітря його охолоджують, випаровуючи воду, яка подається через колектор. Для зміни режиму роботи АПО повертають лопаті робочого колеса вентилятора або жалюзі.

Використання АПО дає змогу суттєво скоротити витрату охолоджувальної води, зменшити кількість стічних вод і виключає необхідність очищення зовнішньої поверхні теплообмінних труб. АПО мають порівняно низький коефіцієнт теплопередачі.

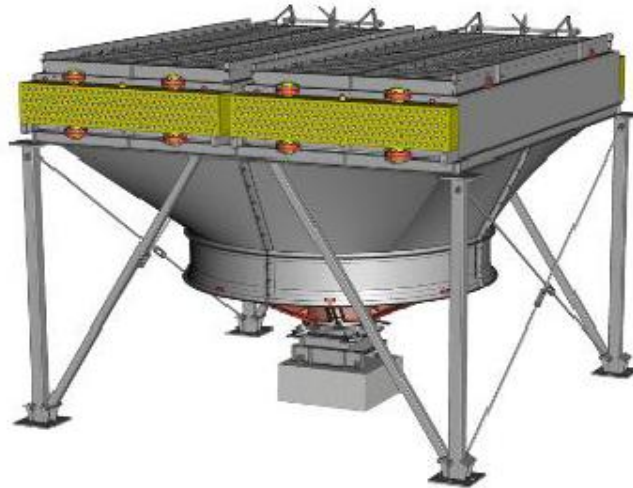


Рисунок 2.2 – Модель двосекційного апарата повітряного охолодження з горизонтальним розміщенням труб (тип АПГ)

Теплообмінна секція (рис. 2.3) являє собою пучок оребрених труб, розташованих у шаховому порядку по ходу руху охолоджуючого повітря. Кінці труб закладені в трубні решітки та закриті кришками з отворами для приєднання зовнішньої трубопровідної обв'язки.

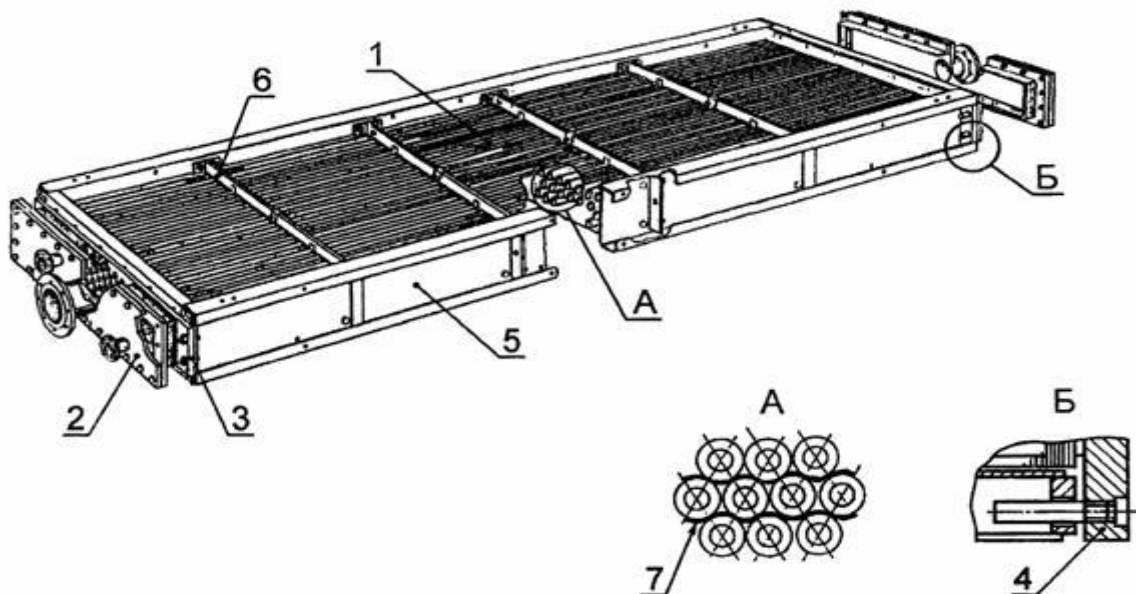


Рисунок 2.3 – Конструкція теплообмінної секції:

1 – трубний пучок; 2 – кришка камери; 3, 4 – нерухома і рухома трубні дошки; 5 – бокова стінка; 6 – балка; 7 – дистанційний елемент

Вентилятори з приводом від електродвигуна призначені для подачі охолоджуючого повітря в теплообмінні секції. Аеродинамічні елементи АПО включають обичайку вентилятора, дифузор і колектор. Несучі конструкції, на яких монтується теплообмінні секції, виконуються залізобетонними.

Теплопередача в апаратах повітряного охолодження відбувається за принципом протитечії, оскільки при цьому забезпечується: найбільший середній температурний напір, що пов'язано зі скороченням розміру поверхні теплопередачі; найкраще використання середовищ, в сенсі отримання найбільшої зміни температур теплоносіїв при мінімальній їх витраті.

Вентилятором повітря продувається через міжтрубний простір. Пучок труб охолоджується зовні. За рахунок тепловідведення через поверхню охолоджується продукт, що протікає всередині трубок. Щоб повітря рівномірно розподілялося по всій охолоджуючій поверхні труб, вентилятор з'єднується з трубними пучками за допомогою дифузорів.

Для конденсатора приймаємо оребрені біметалічні труби (рис. 2.4) з коефіцієнтом оребрення $\phi = 9$.

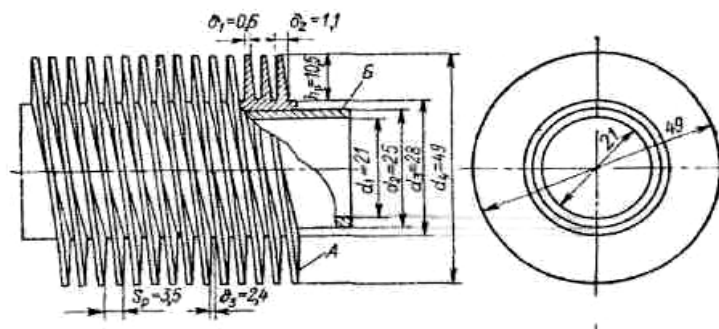


Рисунок 1.4 – Схема оребреної біметалевої труби

2.3 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата [8]

Теплове навантаження проектованого конденсатора повітряного охолодження складе:

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{п}} r_x = 0,3 \cdot 1350 = 405 \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

де $G_{\text{п}}$ – масова витрата гарячого теплоносія (аміак), кг/с;

r_x – питома теплота конденсації аміаку при $p_k = 1,5$ МПа, кДж/кг.

У нашому випадку аміак надходить в апарат при температурі конденсації, яка при тиску 1,5 МПа становить 30°C.

Орієнтовна поверхню теплообміну:

$$F_{\text{max}} = \frac{Q}{q}, \text{ м}^2 \quad (2.2)$$

де q – теплонапряжність апарату, Вт/м². При конденсації парогазової суміші при $T = 30 - 20 = 10$ °C, $q = 400 \div 580$ Вт/м².

Приймаємо $q = 500$ Вт/м².

$$F_{\text{max}} = \frac{405 \cdot 10^3}{500} = 810 \text{ м}^2.$$

Вибираємо стандартизований апарат типу АПГ, так, щоб табличне значення повної зовнішньої оребреної поверхні апарату F_T перевищувало значення F_{max} , тобто $F_T > F_{\text{max}}$:

$$F_T = 875 \text{ м}^2 > 810 \text{ м}^2.$$

Визначаємо основні параметри апарату:

– повна зовнішня обрєблена поверхня апарату F_T , m^2	875
– довжина теплообмінних труб l , m	4
– число секцій n_c	3
– число труб в секції n	94
– число труб в апараті N	282
– коефіцієнт обрєблення труб ϕ	9
– число рядів труб в секції n_p	4
– число ходів по трубах n_x	4
– сумарна площа найбільш вузького міжтрубного перетину S_y , m^2	5,35

За аеродинамічною характеристикою вентилятора визначаємо величини, віднесені до стандартних умов:

- об'ємної витрати повітря $V_0 = 240000 \text{ м}^3/\text{год.}$;
- напору $P_{BO} = 23 \cdot 9,81 = 225,6 \text{ Па}$;
- коефіцієнту корисної дії $\eta_0 = 0,68$.

Для проєктованого апарату вибираємо осьовий вентилятор ЦАГІ КК-2М з кутом установки лопатей 17° , частотою обертання колеса $7,1 \text{ об/с}$ і пропелером діаметром 2800 мм .

Об'ємна витрата повітря, його щільність і тиск вентилятора при робочих умовах ($T = T_{2H} = 291 \text{ К}$ і тиску атмосферного повітря $P = P_0 = 101,3 \text{ кПа}$):

$$V_B = V_0 \cdot \frac{T \cdot P_0}{P \cdot T_0}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.3)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{P \cdot T_0}{T \cdot P_0}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (2.4)$$

$$P_B = P_{BO} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \text{Па} \quad (2.5)$$

де ρ_0 – густина повітря при температурі $T_0 = 273$ К, по [14] $\rho_0 = 1,293$ кг/м³.

$$V'_B = 240000 \cdot \frac{291}{273} = 258 \cdot 10^3 \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}};$$

$$\rho_B = 1,293 \cdot \frac{273}{291} = 1,205 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3};$$

$$P_B = 225,6 \cdot \frac{1,205}{1,293} = 210 \text{ Па}.$$

Масова витрата повітря одним вентилятором:

$$G_B = V'_B \cdot \rho_B, \frac{\text{КГ}}{\text{ГОД}} \quad (2.6)$$

$$G_B = 258 \cdot 10^3 \cdot 1,205 = 311 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{ГОД}}.$$

Із рівняння теплового балансу, кінцева температура повітря:

$$t_{2К} = t_{2Н} + \frac{Q}{c_B \cdot G_B}, \text{ } ^\circ\text{С} \quad (2.7)$$

де $t_{2Н}$ – початкова температура повітря, $^\circ\text{С}$;

c_B – теплоємність повітря за робочих умов; $c_B = 1,005$ кДж/(кг·К).

$$t_{2К} = 18 + \frac{405 \cdot 3600}{1,005 \cdot 311 \cdot 10^3} = 23 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Отримане значення кінцевої температури повітря має задовольняти умові $t_{2к} < t_{1к}$. Умова виконано: $23\text{ }^{\circ}\text{C} < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\psi \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\Gamma}} + r_1 \right) + \frac{1}{\alpha'_{\chi}} + r_2}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.8)$$

де ψ – коефіцієнт збільшення поверхні, $\psi = 12$;

α_{Γ} – коефіцієнт тепловіддачі з боку аміаку, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

α'_{χ} – приведений коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря, що враховує також термічний опір металу, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

r_1 і r_2 – термічні опори можливих забруднень відповідно з боку аміаку і повітря, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$. $r_1 = 0,0006 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$, $r_2 = 0,0004 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Коефіцієнт тепловіддачі з боку аміаку:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{CP1}}}{d_1}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.9)$$

де Nu – критерій Нусельта;

λ_{CP1} – коефіцієнт теплопровідності аміаку, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

d_1 – внутрішній діаметр труби, $d_1 = 0,021 \text{ м}$.

Фізичні параметри аміаку при температурі його конденсації в апараті: густина $595 \text{ кг}/\text{м}^3$; коефіцієнт теплопровідності $0,24 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; теплоємність $2,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; кінематична в'язкість $0,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Мінімальна швидкість руху аміаку в трубах апарату, при якій забезпечується стійкий турбулентний потік, тобто при якій $\text{Re}_{\text{min}} = 10^4$.

$$w_{\text{min}} = \frac{10^4 \cdot \nu_{\text{CP1}}}{d_1}, \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (2.10)$$

$$w_{\min} = \frac{10^4 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6}}{0,021} = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Швидкість аміаку:

$$w_1 = \frac{n_x \cdot V_1}{s_1 \cdot n_c}, \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (2.11)$$

де n_x – число ходів по трубах, $n_x = 4$;

V_1 – об'ємна витрата аміаку, $\text{м}^3/\text{год}$;

s_1 – загальна площа внутрішнього трубного простору, м^2 ;

n_c – число секцій, $n_c = 3$.

Об'ємна витрата аміаку:

$$V_1 = \frac{G}{\rho}, \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.12)$$

$$V_1 = \frac{0,3 \cdot 3600}{595} = 1,82 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} = 5,05 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Загальна площа внутрішнього трубного простору:

$$s_1 = n \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}, \text{ м}^2 \quad (2.13)$$

де n – число труб в секції, $n = 94$.

$$s_1 = 94 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,021^2}{4} = 0,136 \text{ м}^2.$$

Знаходимо швидкість аміаку за формулою (2.11):

$$w_1 = \frac{4 \cdot 5,05 \cdot 10^{-4}}{0,136 \cdot 3} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Критеріальне рівняння тепловіддачі при турбулентному режимі:

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3}, \quad (2.14)$$

де Re – критерій Рейнольдса;

Pr – критерій Прандтля.

$$\text{Re} = \frac{w_1 \cdot d_1}{\nu_{\text{CP1}}}, \quad (2.15)$$

$$\text{Re} = \frac{0,5 \cdot 0,021}{0,15 \cdot 10^{-6}} = 70000.$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu_{\text{CP1}} \cdot c_{\text{CP1}} \cdot \rho_{\text{CP1}}}{\lambda_{\text{CP1}}}, \quad (2.16)$$

$$\text{Pr} = \frac{0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 2,08 \cdot 10^3 \cdot 595}{0,24} = 2,1.$$

Значення критерію Нусельта визначаємо за формулою (2.14):

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot 70000^{0,8} \cdot 2,1^{0,3} = 216.$$

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі з боку аміаку:

$$\alpha_r = \frac{216 \cdot 0,24}{0,021} = 2470 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря:

$$\alpha'_x = 61,6 \lg w - 0,035 \cdot t_{cp2} - 5,81, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.17)$$

де w – швидкість повітря в найвужчому перерізі міжтрубного простору, м/с;

t_{cp2} – середня температура повітря в апараті, °С.

$$t_{cp2} = \frac{t_{2H} + t_{2K}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.18)$$

$$t_{cp2} = \frac{18 + 23}{2} = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Швидкість повітря в найвужчому перерізі міжтрубного простору:

$$w = \frac{V_B}{s_y}, \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (2.19)$$

де V_{cp} – середня об'ємна витрата повітря, м³/с;

s_y – сумарна площа найбільш вузького міжтрубного перетину, $s_y = 5,35 \text{ м}^2$.

$$V_B = \frac{G_B}{\rho_B}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2.20)$$

де $\rho_B = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря при його середній температурі.

$$V_B = \frac{311 \cdot 10^3}{1,05} = 296190 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} = 82,3 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Розраховуємо швидкість повітря в найвужчому перерізі міжтрубного простору за формулою (2.19):

$$w = \frac{82,3}{5,35} = 15,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Знаходимо приведенний коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря:

$$\alpha'_x = 61,6 \cdot \lg 15,4 - 0,035 \cdot 20,5 - 5,81 = 67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі за формулою (2.8):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2470} + \frac{1}{67} + 0,0004} = 64 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Середня різниця температур при $\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{10}{5} = 2$:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.21)$$

де $\Delta t_{\text{г}}$ і $\Delta t_{\text{м}}$ – більша та менша різниці температур між потоками на вході та на виході з апарата відповідно, $^\circ\text{C}$.

$$\Delta t_{\text{г}} = t_1 - t_{2\text{Н}} = 30 - 18 = 12 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_1 - t_{2\text{К}} = 30 - 23 = 7 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{12 + 7}{2} = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Поверхня теплообміну:

$$F_p = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \text{ м}^2 \quad (2.22)$$

$$F_p = \frac{405 \cdot 10^3}{64 \cdot 8} = 791 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт запасу теплообмінної поверхні апарату АПГ:

$$\beta = \frac{F_T - F_p}{F_p} \cdot 100, \% \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{875 - 791}{791} \cdot 100 = 10,62 \%.$$

Для теплообмінних апаратів коефіцієнт запасу поверхні має становити 10–20 %. Отже, умова виконується.

Визначаємо діаметри штуцерів для введення парів і виходу рідкого аміаку:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (2.24)$$

де V – об'ємна витрата продукту, $\text{м}^3/\text{с}$;

w – швидкість руху продукту, $\text{м}/\text{с}$: для газоподібного аміаку $w_{\text{п}} = 5 \div 15 \text{ м}/\text{с}$, приймаємо $w_{\text{п}} = 7 \text{ м}/\text{с}$; для рідкого аміаку $w_{\text{ж}} = 0,5 \div 2,5 \text{ м}/\text{с}$, приймаємо $w_{\text{п}} = 0,5 \text{ м}/\text{с}$.

- діаметр штуцера для введення парів аміаку

Густина парів аміаку:

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (2.25)$$

де ρ_0 – густина парів аміаку за н.у.; $\rho_0 = 0,77 \text{ кг/м}^3$.

$$\rho_1 = 0,77 \cdot \left(\frac{273}{273 + 30} \right) = 0,69 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$V_1 = \frac{0,3}{0,69} = 0,44 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$d_A = \sqrt{\frac{0,44}{0,785 \cdot 7}} = 0,283 \text{ м.}$$

Приймаємо $d_A = 300 \text{ мм}$.

- діаметр штуцера для виходу рідкого аміаку

$$V_2 = \frac{0,3}{595} = 7,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$d_B = \sqrt{\frac{7,3 \cdot 10^{-4}}{0,785 \cdot 0,5}} = 0,04 \text{ м.}$$

Приймаємо $d_B = 40 \text{ мм}$.

2.4 Гідравлічні розрахунки

Аеродинамічний опір пучка труб:

$$\Delta P = 9,7 \cdot \frac{\rho_B}{g} (w_y)^2 n_p \left(\frac{S_p}{d_3} \right)^{-0,72} \cdot \text{Re}^{-0,24}, \quad \text{Па} \quad (2.26)$$

де $\rho_v = 1,197 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря при його початковій температурі;

w_y – швидкість в стиснутому перерізі оребреного трубного пучка, $w_y = 12,9 \text{ м/с}$;

n_p – число горизонтальних рядів труб в пучку (по вертикалі), $n_p = 4$;

S_p – крок ребер, $S_p = 0,0035 \text{ м}$;

d_3 – зовнішній діаметр труби, $d_3 = 0,028 \text{ м}$;

Re – критерій Рейнольдса, віднесений до діаметра труб d_3 .

$$Re = \frac{w_y \cdot d_3}{\nu_v}, \quad (2.27)$$

де ν_v – кінематична в'язкість повітря; $\nu_v = 15,761 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$Re = \frac{15,4 \cdot 0,028}{15,761 \cdot 10^{-6}} = 27359.$$

Аеродинамічний опір пучка труб за формулою (2.26):

$$\Delta P = 9,7 \cdot \frac{1,197}{9,81} \cdot 15,4^2 \cdot 4 \cdot \left(\frac{0,0035}{0,028} \right)^{-0,72} \cdot 27359^{-0,24} = 432 \text{ Па}.$$

Обраний вище вентилятор ЦАГІ КК-2М розвиває напір до 463 Па, а отже він із запасом забезпечить роботу даного апарату.

Витрата енергії для вентилятора:

$$N_3 = 0,00981 \cdot \frac{V_v \cdot \Delta P}{g \cdot \eta}, \quad \text{кВт} \quad (2.28)$$

де V_v – сумарна об'ємна витрата повітря, $V_v = 82,3 \text{ м}^3/\text{с}$;

η – ККД вентилятора, $\eta = 0,68$.

$$N_{\text{э}} = 0,00981 \cdot \frac{82,3 \cdot 432}{9,81 \cdot 0,68} = 52,3 \text{ кВт}.$$

При підборі електродвигуна розрахункову потужність слід збільшити на 10 % для забезпечення пуску двигуна.

Дійсна потужність двигуна:

$$N_{\text{э.д.}} = 1,1 \cdot N_{\text{э}}, \text{ кВт} \quad (2.29)$$

$$N_{\text{э.д.}} = 1,1 \cdot 52,3 = 57,5 \text{ кВт}.$$

Установча потужність електродвигуна становить 75 кВт.

Коефіцієнт використання установчої потужності:

$$\varphi = \frac{N_{\text{э.д.}}}{N_{\text{уст}}}, \quad (2.30)$$

$$\varphi = \frac{57,5}{75} = 0,76.$$

Вибираємо тип електродвигуна 4A250M6У3 з потужністю 75 кВт, синхронною частотою обертання 1200 об/хв.

2.6 Вибір допоміжного обладнання [8]

Для розрахунку компресора необхідно підсумувати кількість парів аміаку, одержуваних у випарниках, що дасть нам величину об'єму Q (л/хв.):

$$Q = \frac{0,3 \cdot 3600}{9,8} = 110,2 \text{ м}^3/\text{год.} = 1840 \text{ л/хв.}$$

Продуктивність компресора визначаємо за рівнянням:

$$A = Q \cdot \frac{\beta}{\eta}, \quad (2.32)$$

де β – коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості і надійність різних груп компресорів;

η – коефіцієнт корисної дії (ККД) компресора.

Приймаємо професійний компресор, для якого $\beta = 1,5$ і $\eta = 0,65$.

У такому випадку продуктивність складе:

$$A = \frac{1840}{2} \cdot \frac{1,5}{0,65} = 2125 \text{ л/хв.}$$

На даний час на холодильних установках знаходять застосування компресори поршневі і ротаційні. Розвивається виробництво гвинтових компресорних агрегатів.

Слід зазначити, що традиційні поршневі компресори прекрасно себе зарекомендували: прості, надійні, не потребують кваліфікованого персоналу для їх обслуговування, невибагливі. Головне не допускати грубого порушення інструкції і своєчасно проводити заміну масла, злив конденсату, профілактичне обслуговування.

Маючи розрахункову величину продуктивності, вибираємо поршковий холодильний компресор марки ФУУ30 з такими характеристиками: кінцевий тиск 8 МПа; діаметр циліндра / хід поршня 76,6 / 55 мм; теоретична об'ємна подача 2400 л/хв. (0,040 м³/с); холодопродуктивність 108 кВт; споживана потужність 24,5 кВт.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вибір конструкційних матеріалів [8, 9]

При виборі конструкційного матеріалу для виготовлення деталей та вузлів будь-якої хімічної апаратури слід враховувати наступні рекомендації [9]:

1. Температурна стійкість. Розглядайте максимальні та мінімальні температури, з якими буде зіштовхуватися елемент або апарат в процесі експлуатації. Обирайте матеріал, який відповідає цим температурним умовам. Для високих температур можуть використовуватися спеціальні термостійкі або вогнетривкі матеріали.

2. Механічна міцність та деформаційна стійкість. Враховуйте механічні навантаження та деформації, яким буде піддаватися матеріал. Обирайте матеріал, який здатний витримувати необхідні механічні напруження та не піддається небажаним деформаціям.

3. Корозійна стійкість. Розглядайте хімічні середовища, з якими буде стикатися матеріал. Вибирайте матеріал, який є стійким до корозії або застосовуйте захисні покриття або обробки, якщо необхідно.

4. Електричні та теплові властивості. Якщо важливі електричні або теплові властивості, обирайте матеріал, який відповідає цим вимогам. Деякі застосування можуть вимагати високої теплопровідності або ізоляційних властивостей.

5. Вартість та доступність. Враховуйте вартість обраного матеріалу та його доступність на ринку.

Аміак (NH_3) є корозійно активною речовиною, і вибір матеріалів, які можуть контактувати з аміаком, повинен бути обраний з урахуванням його властивостей та умов експлуатації.

Нержавіюча сталь, зокрема, ті, які містять нікель і хром, є дуже добрим вибором для контакту з аміаком, за умов низького тиску та

температури. Нікель і хром забезпечують високу стійкість до корозії та окислення. Низькі температури і низький тиск зазвичай сприяють покращенню стійкості матеріалів до корозії, оскільки аміак може бути менш агресивним при таких умовах. Проте, при високих температурах або високому тиску можуть виникати проблеми, і тут також важливо обирати матеріали з належною термічною та механічною стійкістю.

Тому, для виготовлення основних вузлів та деталей, які контактують з аміаком використовуємо сталь 12X18H10T. Дана нержавіюча сталь має високу стійкість до корозії, що дуже важливо для процесів, де взаємодія з агресивними середовищами, такими аміак, є надзвичайною. Вона має гарну теплопровідність, що сприяє ефективному теплообміну.

Також для проєктованого апарату повітряного охолодження приймаємо біметалічні труби виконання БЗ. Така труба складається із внутрішньої (сталеві) і зовнішньої (алюмінієвий сплав АД1М) з накатним гвинтовим ребром. Алюміній має низку властивостей, які відрізняють його від інших металів. По-перше, це невелика щільність, гарна пластичність і достатня механічна міцність, високі тепло- і електропровідність. По-друге, алюміній нетоксичний, немагнітний і корозійностійкий до ряду хімічних речовин.

Пароніт є традиційним матеріалом для виробництва прокладок і використовується для ущільнення фланцевих з'єднань в різних промислових застосуваннях. Пароніт виготовляється пресуванням асбокаучукової маси. Його основні компоненти включають азбест, каучук і порошкові інгредієнти.

Пресування призводить до отримання твердого, листового матеріалу, який може бути нарізаний або вирубаний у вигляді прокладок для конкретних застосувань.

Пароніт може бути гнучким і легко адаптується до форми поверхонь. Він має добрі ущільнювальні властивості, що робить його ефективним для використання в ущільненні фланцевих з'єднань.

3.2 Розрахунки на міцність та стійкість [8, 10]

Розрахунок плоскої кришки.

Вихідні дані для розрахунку: розрахунковий внутрішній тиск $p=1,5$ МПа; розрахункова температура стінки $t = 30^{\circ}\text{C}$; матеріал – Сталь 12Х18Н10Т; розрахункова довжина кришки секції $D = 1300$ мм; проникність матеріалу $\Pi = 0,1$ мм/рік; термін служби апарату $\tau = 15$ років.

Розрахункова товщина стінки плоскої кришки, що працює під внутрішнім тиском:

– при розрахункових параметрах

$$s_{\text{IR}} = K \cdot K_0 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma] \cdot \varphi}}, \text{ мм} \quad (3.1)$$

де K – коефіцієнт, який визначається в залежності від з'єднання кришки з корпусом; $K = 0,41$;

K_0 – коефіцієнт ослаблення кришки;

D_R – розрахункова довжина кришки; $D_R = D = 1300$ мм;

φ – коефіцієнт міцності зварного шва, $\varphi = 1,0$;

$[\sigma]$ – допустиме напруження в робочому стані.

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \text{ МПа} \quad (3.2)$$

де σ^* – нормативна допустима напруга при розрахунковій температурі;

$\sigma^* = 131$ МПа – для сталі 12Х18Н10Т при температурі 30°C ;

η – поправочний коефіцієнт, що враховує вид заготовки, $\eta = 1,0$.

$$[\sigma] = 131 \cdot 1,0 = 131 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт ослаблення для кришки, що має кілька отворів:

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{2 \cdot d_A}{D_R}\right)^3}{1 - \frac{2 \cdot d_A}{D_R}}} \quad (3.3)$$

Беремо до уваги отвори під штуцер А, оскільки по діаметру вони більше.

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{2 \cdot 300}{1300}\right)^3}{1 - \frac{2 \cdot 300}{1300}}} = 1,29.$$

Визначасмо розрахункову товщину стінки плоскої кришки при розрахункових параметрах за формулою (3.1):

$$s_{iR} = 0,41 \cdot 1,29 \cdot 1300 \cdot \sqrt{\frac{1,3}{131 \cdot 1,0}} = 50,4 \text{ мм.}$$

– при гідравлічному випробуванні

$$s_{iRи} = K \cdot K_0 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{p_{и}}{[\sigma]_{и} \cdot \varphi}}, \text{ мм} \quad (3.4)$$

де $p_{и}$ – пробний тиск при гідравлічному випробуванні, МПа;

$[\sigma]_{и}$ – допустиме напруження при гідравлічному випробуванні, МПа.

Пробний тиск при гідравлічному випробуванні:

$$p_{и} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \\ p + 0,3 \end{array} \right\}, \text{ МПа} \quad (3.5)$$

де $[\sigma]_{20}$ – допустиме напруження для ВСт3пс при температурі $+20^{\circ}\text{C}$, обчислюємо його за формулою (3.2):

$$[\sigma] = 140 \cdot 1,0 = 140 \text{ МПа}.$$

Визначаємо пробний тиск при гідравлічному випробуванні за формулою (3.5):

$$p_{и} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot 1,3 \cdot \frac{140}{131} = 1,74 \\ 1,3 + 0,3 = 1,6 \end{array} \right\} = 1,74 \text{ МПа}.$$

Допустиме напруження при гідравлічному випробуванні:

$$[\sigma]_{и} = \frac{\sigma_{т 20}}{1,1}, \text{ МПа} \quad (3.6)$$

де $\sigma_{т 20}$ – мінімальне значення межі текучості матеріалу при температурі $+20^{\circ}\text{C}$; $\sigma_{т 20} = 210$ МПа для сталі 12Х18Н10Т.

$$[\sigma]_{и} = \frac{210}{1,1} = 190,91 \text{ МПа}.$$

Визначаємо розрахункову товщину стінки плоскої кришки при гідравлічному випробуванні за формулою (3.4):

$$s_{IRн} = 0,41 \cdot 1,29 \cdot 1300 \cdot \sqrt{\frac{1,74}{190,91 \cdot 1,0}} = 45 \text{ мм.}$$

Збільшення до розрахункової товщини стінки:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \text{ мм} \quad (3.7)$$

де c_1 – прибавка для компенсації корозії та ерозії, мм;

c_2 – прибавка для компенсації мінусового допуску, $c_2 = 0$;

c_3 – технологічна прибавка, $c_3 = 0$.

Надбавка для компенсації корозії та ерозії:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau + c_3, \text{ мм} \quad (3.8)$$

де Π – проникність матеріалу, $\Pi = 0,1$ мм/рік;

τ – термін служби апарату, $\tau = 15$ років;

c_3 – прибавка для компенсації ерозії, $c_3 = 0$.

$$c = c_1 = 0,1 \cdot 15 + 0 = 1,5 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина плоскої кришки, що працює під внутрішнім тиском:

$$s_1 = \max(s_{IR}; s_{IRн}) + c, \text{ мм} \quad (3.9)$$

$$s_1 = \max(50,4; 45) + 1,5 = 50,4 + 1,5 = 51,9 \text{ мм.}$$

Округлюємо до більшого стандартного значенням і отримуємо $s_1 = 52$

мм.

Перевіряємо умову застосування розрахункових формул для плоскої кришки:

$$\frac{s_1 - c}{D_R} \leq 0,1, \quad (3.10)$$

$$\frac{44 - 1,5}{1300} = 0,033 < 0,1.$$

Умову застосування розрахункових формул виконано.

4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання [11, 12]

Вибір між відкритим, закритим та комбінованим варіантом компонування для аміачної холодильної установки дійсно залежить від численних факторів і умов.

Технічні вимоги:

- температурні умови – якщо важливо забезпечити низькі температури, може вибрати закритий або комбінований варіант для збереження аміаку та ефективного теплообміну;
- тиск – високий тиск може вимагати використання закритої системи для забезпечення безпечності та ефективності.

Безпекові стандарти:

- стандарти безпеки можуть визначати тип компонування для забезпечення захисту персоналу та навколишнього середовища.

Експлуатаційні фактори:

- обслуговування і ремонт – доступність для обслуговування та ремонту може бути важливою умовою при виборі компонування;
- ефективність – кожен варіант має свої переваги щодо ефективності роботи та витрат енергії.

Екологічні вимоги:

- витіки аміаку – закриті системи можуть зменшити ризик витіку аміаку в навколишнє середовище, що важливо для екологічних стандартів.

Розмір та простір:

- простір інсталяції – доступність простору може обмежувати вибір між варіантами компонування;
- розмір установки може також впливати на ефективність роботи та вибір оптимального варіанту.

Експлуатаційна вартість:

- різні варіанти можуть мати різні витрати на експлуатацію, включаючи енергозбереження та обслуговування.

Важливо провести докладний аналіз всіх цих факторів та врахувати їх при виборі компонування для аміачної холодильної установки. Спеціалістів з проектування та експлуатації холодильних систем також може бути корисною консультація для оптимального вибору в конкретному випадку.

При виборі варіанту слід враховувати безпекові стандарти, які регулюють роботу з аміаком, і відповідати їм. Також важливо провести оцінку ризиків та безпекові аудити, щоб визначити оптимальний варіант для конкретного виробництва або об'єкта. Обговорення із фахівцями з безпеки та інженерами з холодильних систем також є необхідним етапом при прийнятті рішення. Для нашого випадку вибираємо відкритий варіант компонування обладнання. Розміщення обладнання на відкритому майданчику може значно зменшити капітальні витрати порівняно з будівництвом закритих споруд. Відкритий майданчик забезпечує кращу вентиляцію, що допомагає уникнути накопичення газів і теплових виділень. Відкритий майданчик може покращити умови роботи, зменшити ризик вибухів та пожеж, оскільки швидше розсіюються викиди та тепло. Також дозволяє легше доступатися до обладнання для обслуговування та ремонту.

При обранні розташування обладнання на відкритому майданчику, важливо дотримуватися рекомендацій та керуватися технічними нормами і стандартами безпеки. Бажано розташовувати важке і габаритне обладнання на позначці землі, оскільки це забезпечить стійкість та надійність під час експлуатації. Важливо враховувати необхідність високопрочних опорних конструкцій. Для опорних пристроїв рекомендується використовувати типові конструкції залізобетону. Вони відомі своєю міцністю та стійкістю до навантажень і погодних умов.

Для великогабаритних апаратів можна максимально використовувати несучу здатність їхніх стінок. Це може включати встановлення етажерок, сходів і майданчиків для обслуговування. Такий підхід дозволить оптимізувати простір і полегшити доступ до обладнання. Усе обладнання слід розміщувати на нульовій позначці щодо загального (групового) фундаменту. Це спрощує процес монтажу та обслуговування.

Ємності, насоси і теплообмінне обладнання, які вимагають додаткової стійкості і стабільності, можуть бути розташовані на індивідуальних фундаментах. Це забезпечить надійну підтримку для цих об'єктів. Також розміщення обладнання на відкритих майданчиках має враховувати ряд важливих вимог та рекомендацій з метою забезпечення безпеки, зручності обслуговування та ефективності робочих процесів:

Передбачте наявність проходів між обладнанням, щитами і конструкціями таким чином, щоб забезпечити безпечний доступ для обслуговування обладнання, рух людей і транспорту. Мінімальна ширина проходів між найвиступнішими частинами обладнання, щитами і конструкціями повинна бути не менше 1 метра. Це сприяє запобіганню заторам і забезпечує швидкий доступ у разі аварій.

Технологічне обладнання, яке створює вібрацію і шум на робочих місцях, рекомендується встановлювати на спеціальних фундаментах і амортизаторах. Це допомагає знизити вплив вібрації та шуму на працівників і забезпечує комфортні умови роботи. Під час розміщення обладнання рекомендується виділяти групи апаратів, які мають спільні ознаки або призначення. Це сприяє організації робочих зон і полегшує обслуговування. Наприклад, апарати однієї технологічної лінії можуть бути розташовані поруч для зменшення витрат часу на переміщення працівників.

Враховуючи вимоги та рекомендації, можна створити безпечну та ефективну робочу обстановку на відкритому майданчику для аміачної холодильної установки. Ретельно дотримуйтесь всіх стандартів та вимог

щодо безпеки праці для обслуговування та експлуатації аміачних холодильних установок. Забезпечте належну інструктаж для персоналу, щоб вони розуміли потенційні ризики та знали процедури безпеки.

Розмістіть аміачне обладнання віддалено від робочих зон і місць перебування персоналу. Створіть відділення або бар'єри, щоб уникнути непередбачених контактів з аміаком.

Забезпечте ефективну систему вентиляції для швидкого виведення аміаку у випадку витoku. Регулярно перевіряйте та обслуговуйте систему вентиляції для забезпечення її надійності.

Забезпечте легкий доступ для технічного обслуговування та ремонту обладнання. Розмістіть обладнання так, щоб уникнути непотрібного пересування та взаємодії з персоналом.

Встановіть зони з обмеженим доступом та контроль навколишнього простору. Визначте інструкції щодо доступу для авторизованого персоналу.

Установіть системи виявлення витoku аміаку та тривожні системи для негайного реагування на потенційні загрози. Проводьте регулярні перевірки та тести систем виявлення та тривоги.

Використовуйте високоякісне технічне обладнання з безпечними та ефективними характеристиками. Розміщуйте обладнання так, щоб уникнути перевантаження та забезпечити оптимальні умови експлуатації.

Проектування трубопроводів є важливим етапом в процесі створення хімічного обладнання та інженерних систем для транспортування і обробки різних речовин. Виправлення трубопроводів має бути грамотно відпрацьоване для забезпечення безпеки, ефективності та надійності експлуатації.

Під час розробки схеми трубопроводів важливо враховувати фізико-хімічні властивості речовин, які будуть транспортуватися, а також дані, отримані на етапі розрахунку апаратного оформлення процесу. Це

дозволяє правильно підібрати матеріали труб, їх діаметри, тиск та температурний режим.

Залежно від призначення та характеристик перекачуваних речовин, трубопроводи поділяються на 3 групи: перша група включає трубопроводи для небезпечних речовин; друга – для менш небезпечних; третя – для інших речовин.

При трасуванні трубопроводів важливо враховувати низку факторів, таких як ефективність, безпека, зручність обслуговування і т. д. Пряма прокладка «від штуцера до штуцера» допускається лише у виняткових випадках, коли інші варіанти неможливі. Шлангові труби слід прокладати так, щоб вони були якнайкоротшими і не перетинали обслуговуючі майданчики апарату.

Правила трасування трубопроводів є важливими для забезпечення безпеки та ефективності експлуатації систем транспортування різних речовин:

1. Трубопроводи мають бути розташовані в одному пучку, де перетини труб мають просту форму, такі як горизонтальні або вертикальні ряди. Це дозволяє легше обслуговувати фланцеві з'єднання та інші пристрої.

2. Гарячі трубопроводи, які працюють при підвищених температурах, мають бути розміщені на відстані 3-5 діаметрів труби. Для компенсації температурних напружень на довгих гарячих трубопроводах може бути необхідно використовувати П-подібні ділянки.

3. Для запобігання гідравлічним ударам на довгих трубопроводах слід передбачити можливість відведення рідини з мішків. На газопроводах також необхідно встановлювати дренажні трубки для відведення конденсату.

4. При необхідності, трубопроводи повинні бути теплоізованими. Це допомагає підтримувати температурний режим роботи і запобігає втраті тепла.

4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [8, 12, 13]

Монтаж апаратів повітряного охолодження проводиться у максимально зібраному вигляді – уже зі встановленими вузлами трубопроводів та металоконструкціями каркасів. Установці апарату в проектне положення передують його гідравлічне випробовування на міцність та герметичність. При цьому окремо випробовують міжтрубний і трубний простори.

Апарати встановлюють у проектне положення на фундамент або іншу підставу за допомогою монтажних кранів або інших вантажопідійомних механізмів.

Монтаж, пуск, експлуатація і ремонт АПО повинні проводитися із дотриманням правил безпеки, що встановлені для окремих видів робіт, загальних правил безпеки та пожежної безпеки, викладених у відповідних інструкціях, що діють на даному виробництві.

Апарат повітряного охолодження встановлюється на спеціальній технологічній етажерці. Монтаж АПО проводиться у такій послідовності:

1. Виставляють на технологічній етажерці контейнери; з'єднують та закріплюють їх між собою кріпильними болтами;
2. На контейнер встановлюють дифузори; з'єднують та закріплюють їх між собою кріпильними болтами;
3. Встановлюють та закріплюють теплообмінні секції на штирі дифузорів із відповідним маркуванням;
4. Перевіряють якість виготовлення шпильок, гайок та шайб: різьба повинна бути без забруднень, подряпин, зривів тощо; поверхня на нарізаній частині шпильок – гладкою; гайка, надіта на різьблення шпильки, не повинна мати слабину.

5. Затягують усі болтові з'єднання, використовуючи стандартні ключі, без подовжувачів;

6. Перед затягуванням гайок зробити ретельний огляд привалочних поверхонь фланців – дефекти на цих поверхнях не допускаються.

7. Перевіряють установку в теплообмінній секції відповідних фланців і прокладок на штуцерах входу і виходу робочого середовища.

8. Також слід перевіряти розмір і стан прокладок на відповідність їх розмірам привалочних поверхонь стикуючих фланців. Далі перевірити правильність установки прокладок, переконатися в наявності повного комплекту шпильок в отворах фланців і в тому, що прокладки увійшли в пази. Неповний комплект шпильок або перекося фланців не допускається. Також забороняється підтяжка шпильок під час роботи апарату.

Виявлені під час монтажу дефекти та методи їх усунення повинні бути зареєстровані в паспорті АПО.

Виконати під'єднання АПО до всіх необхідних комунікацій і арматури. Очистити від бруду і сторонніх предметів підводи і відводи трубопроводів перед приєднанням до апарату.

Провести заземлення апарату у відповідності вимогам ПУЕ.

Правильність установки апарату на фундамент вивіряють: теплообмінних секцій – гідростатичним або брусковим рівнем; осей опорних стійок – схилом; відхилення площин кронштейнів опорних стійок від розташування в одній горизонтальній площині – по натягнутій струні; відхилення від горизонтальності приводу вентилятора – брусковим рівнем.

При установці колеса вентилятора повинен бути витриманий рівномірний радіальний зазор в межах допустимих розмірів. При центруванні валів вимірювання слід проводити в чотирьох положеннях при спільному повороті напівмуфт на 90° . Центрування приводу вважається правильним, якщо різниця діаметрально протилежних розмірів перекося і паралельного зміщення осей не перевищують 0,06 мм (при діаметрі муфти 250 мм).

Апарати повітряного охолодження часто працюють в умовах підвищеної корозійної активності. Для боротьби з корозійними середовищами в трубних секціях АПО, зазвичай, використовують біметалічні труби із внутрішніми трубами із латуні чи сталі. Трубні решітки також можуть бути виготовлені біметалічними – із захисним шаром латуні товщиною 8 мм.

Стан зовнішньої поверхні елементів апаратів повітряного охолодження, працюючих під тиском, перевіряється у наступних місцях: у місці приварювання фланців; у місці перетину зварних швів; зовнішньої поверхні трубного простору.

Перевіряються наступні дефекти: на поверхні – тріщини, надриви, підвищена швидкість корозії стінок; на зварних швах – дефекти зварювання, тріщини, надриви тощо.

Апарат, який підлягає розборці для ремонту і очищення, повинен бути зупинений, звільнений від теплоносіїв, відключений і заглушений від іншої апаратури, пропарений і пройдений азотом. Повинні бути створені нормальні умови, а саме: тиск – атмосферний, температура – знижена до нормальної, вибухо- і пожежонебезпечні середовища – відсутні. У деяких випадках пропарку і промивку чередують кілька разів. Не можна приступати до ремонтних робіт, якщо температура промивної води перевищує 50°C.

Найбільш поширеними дефектами у апаратів з трубною системою є:

1. Виривання трубок із трубних решіток. Дана проблема, зазвичай, виникає через нерівномірне розширення трубок і корпусу. Варіанти вирішення:

- зачищення місця розриву і обварювання трубки заново;
- висвердлювання трубки і установка нової трубки;
- зачищення і заглушка трубки.

Якщо встановлюються заглушки на дефектні трубки, необхідно враховувати, що опір даної ділянки зростає, а також трохи погіршується

теплообмін. Зазвичай, теплообмінники розраховують таким чином, щоб без сильного впливу на технологічний процес можна було заглушити до 10 % трубок.

2. Наскрізна корозія трубок. Дана проблема виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при неправильно підбраному матеріалі трубчатки. Варіанти вирішення:

- висвердлювання трубки і установка нової трубки;
- зачищення і заглушка трубки.

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

3. Наскрізна корозія корпусу чи камери. Дана проблема, так само як і наскрізна корозія трубок, зазвичай виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при неправильно підбраному матеріалі. Варіанти вирішення:

- підварювання або установка заплатки;
- виготовлення нової камери чи корпусу.

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

Варіанти вирішення:

- механічне очищення;
- хімічне очищення.

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

засмічення теплообмінника (вимірювання температури або протитиску) і чистити його.

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

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

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

Усі поверхні ущільнювачів слід контролювати магнітною або ультразвуковою дефектоскопією на відсутність тріщин. Після ремонту конденсатора його піддають гідравлічним або пневматичним випробуванням.

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [14, 15]

Конденсація аміаку в апаратах повітряного охолодження – це процес переходу аміаку з газоподібного стану в рідкий стан за умов зниження температури. Під час цього процесу важливо контролювати кілька параметрів для забезпечення ефективності та безпеки системи. Основні контрольовані параметри під час конденсації аміаку в апаратах повітряного охолодження включають:

1. *Температура конденсації* – це температура, при якій аміак переходить з газоподібного стану в рідкий стан. Контроль температури конденсації важливий для ефективного видалення тепла та забезпечення оптимальної роботи системи.

2. *Тиск конденсації* – тиск, при якому відбувається конденсація аміаку. Контроль тиску важливий для уникнення можливих аварій та забезпечення безпечної експлуатації.

3. *Ступінь насичення (густини) аміаку* – визначає кількість аміаку, яке може бути розчинено у рідині при даній температурі та тиску. Важливо для ефективного використання робочого речовини.

4. *Температура охолодженого повітря* – температура повітря, яке використовується для конденсації аміаку. Цей параметр впливає на ефективність теплообміну.

5. *Кількість тепла, віддається при конденсації* – визначається величиною теплоти, яка вивільнюється або віддається при переході аміаку з газоподібного в рідкий стан. Цей параметр важливий для розрахунку енергетичної ефективності системи.

6. *Рівень рідини в конденсаторі* – контроль рівня рідини дозволяє уникнути небажаних ситуацій, таких як переливання або недостатній рівень для ефективної конденсації.

7. *Ефективність конденсації (коефіцієнт конденсації)* розраховується як відношення кількості тепла, віддається під час конденсації, до кількості тепла, яке може бути віддано при ідеальних умовах. Визначає ефективність процесу конденсації.

Ці параметри слід систематично моніторити та контролювати, щоб забезпечити надійну та безпечну роботу аміачної холодильної установки.

Автоматизація виробничих процесів є ключовим напрямком для підвищення ефективності та якості виробництва. Розробка та впровадження автоматичних систем вимагає врахування ряду прогресивних напрямків та використання сучасних методів аналізу та оцінки.

Застосування сенсорів, збирачів даних та обмін даними через мережі сприяють створенню «розумних» виробничих систем, які можуть автоматично реагувати на зміни у виробничому процесі. Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу даних та прийняття рішень, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси та управління системами. Обробка великих обсягів даних дозволяє виявляти тенденції, прогнозувати відмови обладнання, а також оптимізувати виробничі параметри. Застосування роботів та автоматизованих систем для виконання завдань у виробництві зменшує необхідність людського втручання та сприяє підвищенню продуктивності.

Використання точних та надійних сенсорів, вимірювальних пристроїв та систем контролю для забезпечення якості продукції та оперативного контролю. Інтеграція фізичних та цифрових компонентів для створення розумних виробничих систем, які можуть співпрацювати та адаптуватися до змін. Впровадження систем управління, які можуть автоматично регулювати параметри процесів, враховуючи внутрішні та зовнішні фактори. Усе це має спрямованість на створення гнучких, ефективних та інтелектуальних виробничих систем, які можуть ефективно пристосовуватися до змін у виробничому середовищі.

Перехід на автоматичне регулювання може принести ряд переваг:

1. Автоматичне регулювання дозволяє швидко та точно реагувати на зміни у виробничому процесі. Це може покращити загальну ефективність та продуктивність установки.

2. Системи автоматичного регулювання можуть забезпечити точне управління параметрами процесу, такими як температура, тиск, витрати реагентів і т. д. Це дозволяє уникнути значних відхилень від заданих значень.

3. Автоматичне регулювання може сприяти оптимізації використання енергії та ресурсів, зменшуючи енерговитрати та покращуючи загальну енергоефективність.

4. Системи автоматичного регулювання можуть бути налаштовані для адаптації до змінних умов виробництва, що робить їх більш гнучкими та відповідальними на зміни у середовищі.

5. Автоматичне регулювання дозволяє мінімізувати втрати сировини, матеріалів та енергії через точне керування процесом та ресурсами.

6. Автоматизація може поліпшити безпеку, особливо в умовах виробництва, де важливо швидко та ефективно реагувати на аварійні ситуації.

7. Автоматизовані системи можуть функціонувати практично без участі операторів, зменшуючи ризик помилок та оптимізуючи виробничий процес.

5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [15]

Датчики температури, датчики концентрації та перетворювачі тиску грають ключову роль в системах моніторингу та керування в промислових установках.

Датчики температури вимірюють температуру в системі. Використовують термоелементи, терморезистори або термопари для

генерації електричного сигналу, який пропорційний температурі. Використовуються для контролю температурного режиму обладнання та середовища в промислових процесах.

Датчики концентрації вимірюють рівень розчинених речовин у середовищі. Засновані на зміні електричних властивостей (наприклад, опору) під впливом концентрації певної речовини. Використовуються в хімічній промисловості, обробці води, контролі забруднення та інших сферах для моніторингу рівня речовин у середовищі.

Перетворювачі тиску вимірюють тиск в системі. Використовують датчики тиску, такі як п'єзоелектричні, п'єзорезистивні чи капсульні датчики, щоб перетворити тиск у вимірюваний електричний сигнал. Використовуються для контролю тиску в різних галузях, таких як виробництво, нафтогазова промисловість, системи водопостачання та інші.

Електропневматичні перетворювачі перетворюють електричний сигнал в сигнал, який керує пневматичним обладнанням. Використовують компресований повітря для керування пневматичними актуаторами на основі отриманого електричного сигналу. Використовуються для автоматизації та керування пневматичними системами, такими як клапани та вентилі.

Ці компоненти взаємодіють для забезпечення ефективної та безпечної роботи промислових систем. Системи автоматизації та контролю виграють важливу роль у забезпеченні стабільності та ефективності промислових процесів.

Вибір приладів автоматизації є критичним етапом при розробці будь-якої автоматизованої системи. Розглянемо основні ключові критерії при виборі приладів автоматизації:

1. Інтеграція з іншим обладнанням. Переконайтеся, що обрані прилади легко інтегруються з іншим обладнанням у системі. Сумісність та зручність інтеграції є важливими факторами для забезпечення високої ефективності системи.

2. *Технічні характеристики.* Ретельно досліджуйте технічні характеристики приладів, такі як точність вимірювань, частота вимірювань, швидкість реакції і т. д. Обирайте ті, які найкраще відповідають вимогам процесу.

3. *Енергоефективність.* Якщо енергоефективність є важливим фактором для вашої системи, розгляньте прилади, які мають оптимізовану споживану потужність та можливості енергозбереження.

4. *Можливості розширення.* Плануйте на майбутнє, обираючи прилади з можливостями розширення або оновлення. Це дозволить легше впроваджувати нові функції або адаптувати систему до змін у виробничих умовах.

5. *Надійність та тривалість служби.* Досліджуйте рейтинги та відгуки виробників щодо надійності приладів та тривалості їх служби. Важливо обирати обладнання, яке може працювати безперебійно протягом тривалого періоду.

SIEMENS пропонує широкий вибір вимірювальних перетворювачів температури, які надійно функціонують навіть у найскладніших умовах. Датчики температури цієї фірми застосовуються у різних промислових галузях, таких як хімічна, фармацевтична, харчова, енергетична та інші. Вони гарантують точне вимірювання температури, навіть в екстремальних умовах.

Серія перетворювачів SITRANS T включає універсальні перетворювачі з вихідним сигналом 4–20 мА + HART, які можна програмувати за допомогою ПК. Ці перетворювачі дозволяють зручно контролювати температуру в вашому процесі та передавати дані в автоматизовану систему керування.

Окрім того, доступні варіанти термометрів з цифровою індикацією показань, що полегшують спостереження за температурою. Якщо вам потрібно використовувати датчики температури в вибухонебезпечних середовищах, SIEMENS також пропонує вибухозахищені варіанти датчиків.

Сімейство витратомірів SITRANS F від SIEMENS є ідеальним рішенням для точного та безперервного вимірювання витрати різних середовищ. Вони використовують сучасні та надійні методи для вимірювання витрати рідини та суспензій. Серія SITRANS F серії M Magflo використовує магнітоіндукційний принцип для вимірювання витрати електропровідних рідин та суспензій. Ці витратоміри є надійними та дозволяють вимірювати витрату різних середовищ, забезпечуючи точність та стабільність результатів. За допомогою витратомірів SITRANS F можливо ефективно контролювати витрату рідин та суспензій і підтримувати оптимальний рівень виробництва.

Сімейство рівнемірів SIEMENS в рамках серії SITRANS L є ідеальним рішенням для контролю рівня рідких і сипких середовищ. Вони надають можливість вирішити широкий спектр завдань, пов'язаних з контролем рівня в різних умовах і середовищах. Сигналізатор граничного рівня Pointek CLS 200 є універсальним і відрізняється високою хімічною стійкістю. Він призначений для надійного визначення рівня рідини чи сипких матеріалів в ємностях та резервуарах. Цей сигналізатор допомагає попередити переливання або витік рідини, що може призвести до аварійних ситуацій.

Застосування рівнемірів SIEMENS забезпечує надійний та точний контроль рівня рідких і сипких середовищ, що сприяє безпеці та ефективності виробництва. Такі прилади дозволяють уникнути небажаних ситуацій та забезпечують безперебійну роботу системи.

Сімейство вимірювальних перетворювачів SITRANS P, представлене в серії ZD, гарантує надійне та точне вимірювання різних параметрів тиску та рівня рідини в різних умовах та середовищах. Ці перетворювачі призначені для вимірювання надлишкового, вакууметричного, абсолютного та диференціального тисків.

Вони підходять для вимірювання тиску рідких, газоподібних та пароподібних середовищ. Крім того, ці перетворювачі можуть бути використані для вимірювання гідростатичного рівня рідини в ємностях.

Перетворювачі SITRANS P серії ZD мають цифровий індикатор, який дозволяє зручно відслідковувати вимірювані параметри тиску та рівня. Вони володіють високою точністю та надійністю, що робить їх ідеальними для застосування в різних промислових секторах та умовах.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

Робота з аміаком вимагає особливої уваги до безпеки через його потенційну небезпеку для здоров'я людини.

Основні заходи безпеки включають в себе:

1. Вікові обмеження. Визначення максимального віку працівників, які можуть працювати з аміачним обладнанням. Забезпечення, щоб працівники були відповідно підготовлені до роботи з небезпечними речовинами.

2. Медичні обмеження. Проведення медичних оглядів та періодичних медичних обстежень для переконання у фізичній придатності працівників для роботи з аміаком. Визначення медичних обмежень для індивідуумів з певними хворобами або станами здоров'я.

3. Навчання та іспити. Проведення обов'язкового навчання для всіх працівників, які мають працювати з аміаком. Здійснення іспитів для перевірки розуміння безпекових процедур та правил експлуатації.

4. Оснащення заходами індивідуального захисту. Надання працівникам необхідного захисту, такого як спеціальний одяг, респіратори та інше обладнання. Забезпечення тренінгу щодо використання індивідуального захисту.

5. Створення планів екстрених ситуацій та тренувань. Розробка планів дій у випадку аварій або витоку аміаку. Проведення регулярних тренувань для перевірки готовності працівників до надзвичайних ситуацій.

6. Постійний моніторинг та обслуговування обладнання. Регулярний технічний огляд та обслуговування аміачних систем для запобігання можливим витокам та аваріям.

Ці заходи допомагають забезпечити безпеку працівників, які працюють з аміачними холодильно-компресорними установками, та мінімізувати ризики для їхнього здоров'я та безпеки.

Працівники повинні мати необхідні знання та вміння для безпечної експлуатації та обслуговування систем з аміацким обладнанням. Регулярна медична перевірка та забезпечення належної кваліфікації є важливими складовими елементами системи управління безпекою виробництва.

Також важливо дотримуватися вимог щодо належної документації та мати відповідний наказ про допуск до самостійної роботи в цеху. Це сприяє ясності та визначеності в управлінні персоналом та їхній підготовці до роботи із засобами аміачного обладнання.

Контроль за доступом сторонніх осіб до робочих місць і вимога отримання дозволу для роботи ремонтних бригад підкреслюють важливість обмеження доступу та контролю за діяльністю на робочих місцях.

Вказівка на те, що пуск установки в експлуатацію проводиться відповідно до затверджених інструкцій та врахування чинного регламенту, свідчить про системний підхід до дотримання вимог безпеки та регулятивних стандартів. Це сприяє запобіганню аваріям та гарантує безпечну експлуатацію обладнання.

Забезпечення безпеки праці в виробничому середовищі є критичним аспектом для збереження здоров'я та добробуту працівників. Розглянемо декілька рекомендацій, які можуть допомогти зменшити ризики та негативний вплив на робочий персонал:

1. Проведення регулярного навчання. Забезпечте всіх працівників необхідними знаннями щодо правил безпеки та процедур екстреної дії. Організуйте регулярні тренінги та перевірки знань для підтримання високого рівня усвідомленості щодо безпеки.

2. Використання індивідуального захисту. Забезпечте працівників відповідними засобами індивідуального захисту (респіратори, захисні костюми, окуляри тощо). Заохочуйте та нагадуйте про користування цим обладнанням у відповідних ситуаціях.

3. Регулярні технічні перевірки обладнання. Виконуйте регулярні обстеження та технічні перевірки обладнання для попередження можливих поломок або аварій. Проводьте систематичне обслуговування та ремонт обладнання за потреби.

4. Створення чітких процедур екстреної евакуації. Розробіть та навчіть персонал процедури екстреної евакуації та використання засобів пожежогасіння. Періодично проводьте навчання та тренування для підвищення готовності до надзвичайних ситуацій.

5. Система звітності та вивчення подій. Встановіть систему звітності про інциденти та небезпечні ситуації. Аналізуйте події для виявлення причин та прийняття заходів щодо їхнього уникнення в майбутньому.

6. Впровадження ергономічних рішень. Сприяйте використанню ергономічного обладнання та робочих місць для запобігання травмам та хронічним захворюванням. Залучайте фахівців для оцінки та удосконалення робочого середовища.

7. Врахування факторів психосоціального комфорту. Розглядайте питання психосоціального комфорту, таких як робочий графік, навантаження та взаємини в колективі. Створюйте сприятливу атмосферу для психічного здоров'я працівників.

Ці заходи спрямовані на створення безпечного та здорового робочого середовища, де працівники можуть ефективно та безпечно виконувати свої обов'язки.

Заходи техніки безпеки є дуже важливими для забезпечення безпеки та уникнення аварій. Дотримання цих вимог сприяє зниженню ризиків та забезпеченню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці. Розглянемо окремі аспекти вимог:

Навчання та інструктаж. Забезпечте обов'язкове та систематичне навчання всіх працівників безпечним методам роботи, включаючи основи охорони праці та експлуатаційні правила. Проводьте інструктажі перед початком нових видів робіт або використанням нового обладнання.

Перевірка знань. Регулярно перевіряйте знання виробничого персоналу через тестування та інші методи оцінки.

Дотримання вимог. Вимагайте строгого дотримання всіх інструкцій, правил та норм, пов'язаних з безпекою праці та експлуатацією обладнання.

Зберігання та транспортування речовин. Дотримуйтеся встановлених вимог щодо правил зберігання, транспортування та використання речовин, уникайте порушень технологічного процесу та забезпечуйте правильне функціонування виробничого обладнання.

Дотримання цих вимог допоможе створити безпечні та надійні умови праці, а також виключить багато потенційних ризиків та аварійних ситуацій. Регулярний моніторинг та актуалізація процедур і правил також є важливим етапом в управлінні безпекою на робочому місці.

Безпечна експлуатація обладнання, яке працює під тиском, є критично важливою для забезпечення безпеки виробничого процесу. Дотримання нормативів та правил у цьому контексті є ключовими аспектами, що гарантують надійність та безпеку.

Слід використовувати тільки сертифіковане та перевірене технічне обладнання, призначене для роботи під тиском. Виконувати регулярну технічну перевірку, обслуговування та ремонт обладнання.

Дотримання відповідних національних та міжнародних стандартів, які регулюють безпечну експлуатацію обладнання під тиском. Відповідність та періодична перевірка відповідності стандартам.

Розробка та впровадження безпечних процедур монтажу, експлуатації та ремонту обладнання. Навчання персоналу та інформування їх про правила безпеки та процедури дій у випадку аварій.

Систематична оцінка ризиків для визначення потенційних небезпек та розробка заходів з їх профілактики. Впровадження системи попередження аварій та систем реагування на небезпечні ситуації.

Наявність ефективних систем вентиляції для уникнення накопичення небезпечних речовин. Встановлення систем зняття тиску для надійного виведення тискових середовищ у випадку аварії.

Оформлення та наявність актуальної технічної документації щодо встановленого обладнання та відповідних процедур. Проведення регулярних навчань та тренінгів з питань безпеки для персоналу.

Аудити та огляди щодо дотримання нормативів та впровадження процедур безпеки. Загальна концепція полягає в тому, щоб створити комплексну систему безпеки, яка охоплює технічні, технологічні та організаційні аспекти для забезпечення надійності та безпеки обладнання під тиском.

Безпека виробничого процесу є пріоритетом, і виконання нормативів та вимог є запорукою успішної та безпечної експлуатації обладнання. Продовжуйте дотримуватися цих стандартів для забезпечення безпеки працівників та стабільної роботи вашого обладнання.

Концентрація аміаку (NH_3) у повітрі робочої зони виробничого приміщення не повинна перевищувати ГДК (гранично допустимі концентрації) в розмірі 20 мг/м^3 . Це обмеження встановлено для забезпечення безпеки працівників і виключення можливих негативних впливів на здоров'я. ГДК визначає максимально допустиму концентрацію речовин у повітрі, яка не повинна викликати шкідливих ефектів для здоров'я протягом робочого дня або тижня. Таким чином, для аміаку це значення складає 20 мг/м^3 .

Також вказано, що концентрація КО (кислотного оксиду) повинна відповідати класу IV. Класифікація класів КО залежить від їхніх гранично допустимих концентрацій, визначених для того, щоб уникнути негативного впливу на здоров'я людини.

Забезпечення дотримання цих нормативів є важливим для забезпечення безпеки працівників та уникнення небезпеки виробничого процесу.

Періодичне моніторингове вимірювання концентрацій шкідливих речовин та вживання відповідних заходів безпеки є обов'язковими елементами управління безпекою виробничого процесу.

Контроль за концентрацією шкідливих речовин у виробничому середовищі є важливим елементом системи безпеки праці. Різні методи вимірювання можуть бути використані в залежності від конкретних характеристик та властивостей забруднюючих речовин. Важливо, щоб ці вимірювання виконувались кваліфікованим персоналом та з використанням апаратури, яка відповідає вимогам стандартів і нормативів безпеки.

Розглянемо загальні методи контролю за концентрацією шкідливих речовин:

1. Газоаналіз використовує апаратуру для визначення вмісту різних газів у повітрі. Може бути застосований для визначення концентрації шкідливих газів, таких як аміак, сероводень, хлор і т. д.

2. Хроматографія дозволяє розділити і визначити склад суміші речовин. Використовується для визначення концентрації хімічних сполук.

3. Фотометрія вимірює світловий потік або поглиблення світла для визначення концентрації речовин. Використовується для визначення концентрації розчинених речовин у повітрі або рідині.

4. Інші методи вимірювання включають фізичні, хімічні та біологічні методи вимірювання концентрації речовин, такі як вагові методи, електрохімічні сенсори, біоендітестування тощо.

Правильний вибір методу та використання апаратури, що відповідає стандартам, грає ключову роль у надійному вимірюванні та контролі концентрації шкідливих речовин. Кваліфікований персонал, який володіє необхідними знаннями та навичками, є також важливим елементом успішного контролю за безпекою праці в умовах можливого впливу шкідливих речовин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теплотехнічні процеси та установки. Визначення ефективності роботи парокompресійної холодильної установки : метод. вказівки до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни для студ. спец. «Енергетичний менеджмент» / Уклад.: Т. О. Ринкова, В. І. Дешко, В. І. Шкляр, О. В. Хількевич. – К. : РЕУУ «КПІ», 2010. – 33 с.
2. Процеси та апарати хімічної технології : Підручник: У 2 ч. – Ч 2 / Л. Л. Тovaжнянський, А. П. Готлінська, В. О. Лещенко та ін.; За ред. Л. Л. Тovaжнянського; Пер. з рос. Л.А. Копієвської. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 540 с.
3. Врагов А.П., Михайловський Я.Є, Якушко С.І. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв. – Суми: видавництво СумДУ, 2008. – 170 с.
4. Коваленко І.А., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. – Київ: Воля, 2006. – 253 с.
5. Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах "газ (пара) – рідина" : підручник / Я.Є. Михайловський, А.Є. Артюхов, М.П. Юхименко, Н.О. Артюхова ; за заг. ред. Я.Є. Михайловського. – Суми : СумДУ, 2021. – 391 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньої програми «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» : для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання / В. І. Склабінський, Я. Е. Михайловський, Р. О. Острога, М. С. Скиданенко. – Суми : СумДУ, 2019. – 53 с.
7. Чеботарьов В. О. Технічна термодинаміка : Учбовий посібник / В. О. Чеботарьов, А. Д. Беркута. – К. : Вища школа, 1969. – 204 с.

8. Самохвалова Д. Р. Аміачна холодильна установка. Розробити апарат повітряного охолодження для конденсації парів аміаку : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 133 – галузеве машинобудування / наук. кер. Р. О. Острога. Суми : Сумський державний університет, 2022. 54 с.

9. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. для студ. / І.А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ, 2018. – 121 с.

10. Андреев, І. Роз'ємні міцно-щільні з'єднання: навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 138 с.

11. Методичні вказівки до вивчення дисципліни «Проектування хімічних підприємств та основи САПР» / Укл.: О.О. Ляпощенко, В.М. Маренок. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 81 с.

12. Обладнання заготівельних та котельно-зварювальних дільниць ремонтно-механічних цехів хімічних виробництв : навч. посіб. / С.М. Яхненко, М.С. Скиданенко, Є.М. Піддубний. – Суми : СумДУ, 2022. – 170 с.

13. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. [для студ. закл. вищ. освіти]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 233 с.

14. САПР технологічних ліній та комплексів хімічних і нафтогазопереробних виробництв / О. О. Ляпощенко, О. Є. Старинський // Дистанційний курс. – Суми : СумДУ, 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://elearning.sumdu.edu.ua/s/4b-z0x>

15. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.

16. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз'яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – Київ : Основа, 2006. – 448 с.