

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри

підпис, дата

Кваліфікаційна робота магістра

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

Тема роботи: Виробництво пігментного TiO_2 . Розробити та модернізувати випарний апарат з природною циркуляцією розчину

Виконав:
студент групи ХМ.мдн-21чк
Буглак Віталій Анатолійович

підпис

Залікова книжка
№ 22320080

Кваліфікаційна робота магістра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

" ____ " _____ 20__ р.

Підпис голови
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Юхименко Микола Петрович

підпис, дата

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	6
1.1 Вибір схеми виробництва	9
1.2 Модернізація випарного апарату	15
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	17
2.1 Опис технологічної схеми виробництва	17
2.2 Теоретичні основи процесу випаровування	20
2.3 Пристрій і принцип дії проектованого апарата	24
2.4 Технологічні розрахунки	27
2.5 Конструктивні розрахунки	43
2.6 Гідравлічні розрахунки	46
2.7 Вибір допоміжного обладнання	47
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	53
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	53
3.2 Розрахунки апарата на міцність, стійкість та герметичність	54
4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА	60
4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання	60
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	62
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	66
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	66
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	67
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	71

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	71
6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора	75
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	79
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Концентрація розчинів методом випарювання є поширеним технологічним процесом в різних галузях промисловості. Цей процес використовується для збільшення вмісту розчинених речовин у розчині, зменшуючи при цьому об'єм розчину. Принцип дії методу випарювання полягає в тому, що розчин нагрівається, і розчинені в ньому речовини переходять у газоподібний стан, залишаючи залишок розчину більш концентрованим. Потім газоподібні речовини збираються у вигляді пари і можуть бути конденсовані назад у рідкий стан. Цей метод широко використовується у виробництві хімічних речовин, у виробництві продуктів харчування (наприклад, при виготовленні соків, сиропів), а також у металургійній промисловості для концентрації рудних розчинів. Випарювальні апарати можуть бути різних конструкцій і форм, в залежності від конкретних вимог виробництва [1, 2].

Випарювання використовується для концентрації розчинів твердих речовин шляхом видалення розчинника в пароподібному стані. Процес випарювання відбувається при температурі кипіння розчину, що дозволяє видаляти розчинник у пароподібному стані. У більшості випадків, випаровуваний розчинник утворює вторинну пару. Як правило, це вода, яка виходить у пароподібний стан, залишаючи залишок розчину більш концентрованим. Припущення, що вторинна пара складається з чистого розчинника, є практично виправданим і полегшує розрахунки та контроль процесу. Передбачається, що тверда речовина у розчині не випаровується і залишається в розчині [3–5].

У хімічній промисловості широко використовуються безперервно діючі випарні установки для проведення процесу випарювання. Ці установки дозволяють забезпечити велику продуктивність завдяки високій ефективності та постійній роботі. Основні характеристики таких випарних установок [6]:

- працюють в режимі безперервної дії, що дозволяє ефективно та економічно випаровувати великі об'єми розчинів
- наявність великої поверхні нагріву внутрішніх елементів установки;

- завдяки великій поверхні нагріву та оптимізованим теплообмінним процесам, випарні установки можуть мати високу продуктивність, що робить їх ефективними для великосерійного виробництва;
- сучасні випарні установки зазвичай обладнані системами автоматизації та контролю, що дозволяє точно регулювати параметри процесу випарювання;

Використання таких випарних установок є ключовим елементом виробництва та обробки хімічних продуктів у промисловості.

У даній кваліфікаційній роботі [7] досліджено принцип роботи цеху виробництва пігментного двоокису титану та запроєктовано випарний апарат з природною циркуляцією розчину.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ [1–6]

Класифікація випарних апаратів може базуватися на різноманітних факторах, таких як конструктивне оформлення поверхні нагрівання та властивості використовуваного теплоносія. Розглянемо кілька основних категорій випарних апаратів:

1. За теплоносієм:

- вода – випарювачі, які обігріваються водяною парою і використовують конденсацію пари для передачі тепла розчину;
- топкові гази – апарати, де теплоносієм є гази, які утворюються внаслідок спалювання палива (топкових газів);
- органічні теплоносії – випарювачі, які використовують органічні теплоносії висококиплячих рідин, таких як термальні оливи.

2. За конструкцією поверхні нагріву:

- ламельні апарати – випарювачі з ламельною поверхнею для збільшення площі теплообміну;
- трубчасті апарати – випарювачі з трубчастою конструкцією для створення додаткового теплообміну;
- фільмові апарати – апарати, які використовують стінку тонкого фільму розчину для ефективного випарювання.

3. За джерелом енергії:

- парові випарювачі – з використанням водяної пари;
- газові випарювачі – з використанням топкових газів;
- електричні випарювачі – з використанням електричного струму.

Ця класифікація дозволяє враховувати різні умови та потреби виробництва при виборі випарного обладнання. При випарюванні важливо враховувати специфічні вимоги процесу та характеристики випарюваних речовин.

Вертикальні порожнисті циліндри або чашоподібні випарні апарати, обладнані нагрівальними сорочками або спіральними змійовиками, можуть бути прос-

тими за конструкцією, але вони мають деякі обмеження та недоліки, які роблять їх менш ефективними у великосерійному виробництві. Такі апарати мають обмежену питому поверхню нагріву на одиницю робочого об'єму. Це обмежує їхню продуктивність і збільшує громіздкість. У результаті обмеженої питомої поверхні нагріву такі апарати можуть бути менш продуктивними в порівнянні з більш складними та ефективними конструкціями. Часто ці прості апарати знаходять своє застосування в маломасштабних виробництвах, де обсяги розчинів не великі і ефективність менш критична.

Завдяки обмеженій продуктивності і більшим розмірам, такі апарати можуть бути громіздкими і займати багато місця. У великих та високопродуктивних виробництвах, де необхідно велике обсягове виробництво концентрованих розчинів, частіше використовуються більш сучасні та ефективні випарні установки з розвинутою системою теплообміну, що дозволяють збільшити продуктивність та зменшити споживання енергії.

Випарні апарати із зовнішніми циркуляційними трубами є однією з конструкцій, яка дозволяє забезпечити більшу компактність нагрівальної камери. У цьому типі апарату циркуляційні труби розташовані зовнішньо, що дозволяє створити більш компактну та ефективну конструкцію нагрівальної камери. За вартість більшої компактності може бути певний збільшений гідравлічний опір циркуляційного контуру. Це може вплинути на роботу насосів та системи циркуляції. Зовнішні циркуляційні труби можуть покращити ефективність теплообміну, дозволяючи краще передавати тепло від гарячої пари до розчину.

Ця конструкція забезпечує збільшену компактність, що може бути важливим фактором в сучасних виробничих умовах, де простір може бути обмеженим. Деякі конструкції з додатковими пристроями можуть дозволяти регулювання гідравлічного опору для оптимізації ефективності системи.

Такі апарати можуть знайти застосування в різних галузях промисловості, де важливо забезпечити ефективне випарювання та використання обмеженого простору. Однак при їхньому використанні важливо враховувати та управляти гі-

дравлічним опором та іншими факторами, які можуть впливати на ефективність системи.

Апарати зі співвісними і виносними (розосередженими) нагрівальними камерами представляють іншу цікаву конструкцію випарних установок, яка знаходить широке застосування в промисловості. У цих апаратах сепаратор та нагрівальна камера розташовані співвісно. Це може зменшити пінистість та турбулентність розчину, що корисно при концентрації розчинів, що піняться. Цей тип апарату відрізняється спокійним кипінням, що може бути важливим для обробки пінастого матеріалу без ризику викидання піни з апарату.

Завдяки спокійному кипінню, такі апарати особливо рекомендуються для концентрації розчинів, які схильні до утворення піни. Деякі конструкції можуть мати можливість регулювання параметрів, що дозволяє оптимізувати процес в залежності від властивостей випарюваного розчину.

Апарати з розосередженими сепараторами і нагрівальними камерами, хоча можуть мати великі габарити, проте вони мають деякі важливі переваги, які роблять їх вигідними у певних умовах виробництва. Великі габарити можуть забезпечити легкий доступ до внутрішніх елементів апарату, спрощуючи процеси ремонту, технічного обслуговування та очищення. Це важливо для забезпечення ефективності роботи апарату та його тривалого функціонування. Тангенціальний вхід створює обертовий рух, що сприяє ефективному відділенню фаз та зменшує можливість змішування. Деякі моделі можуть мати розосереджені сепаратори, що дозволяє поліпшити технологічні можливості апарату, забезпечуючи кращий контроль процесу випарювання та отримання бажаних характеристик продукту.

Завдяки доступності для обслуговування, такі апарати можуть бути більш простими у використанні та обслуговуванні, що може бути важливим фактором для підтримання продуктивності і тривалості експлуатації.

Випарні апарати із двома виносними нагрівальними камерами та загальним сепаратором – це конструкція, яка забезпечує певні переваги у виробництві та експлуатації. Наявність двох нагрівальних камер дозволяє збільшити поверхню

нагрівання, що може призвести до покращення ефективності теплообміну та збільшення продуктивності. Одночасне використання двох камер дозволяє відключити одну з них для обслуговування або ремонту, не припиняючи робочий процес. Це може підвищити надійність та зручність обслуговування. Залежно від умов виробництва та потреб, можна вибирати, коли використовувати одну або обидві камери в залежності від обсягів та характеристик випарювання.

TiO₂ чутливий до високих температур, а апарат з винесеною гріючою камерою може дозволити більш точний контроль та уникнути перегріву розчину. Випарний трубчастий апарат з винесеною гріючою камерою може забезпечити ефективний теплообмін і забезпечити можливість контролю та регулювання теплового режиму, що важливо для виробництва, яке вимагає точного теплового оброблення. Винесена гріюча камера спрощує процес обслуговування та ремонту, що може стати важливим аспектом для тривалого та неперервного виробництва.

1.1 Вибір схеми виробництва

Діоксид титану (TiO₂) може існувати у двох основних кристалічних формах: анатаз та рутиль. Ці форми відрізняються структурою та властивостями, що може впливати на їхнє застосування в різних галузях.

Технологічні схеми виробництва діоксиду титану включають два основні методи: сульфатний і хлорний способи [8].

Сульфатний спосіб. У цьому методі вихідним матеріалом є руда титану (зазвичай ілменіт або рутиль), яка обробляється сульфатною кислотою. Анатаз може утворюватися внаслідок сульфатного оброблення при певних температурах та умовах. Рутильні пігменти також можуть бути отримані внаслідок подальшого оброблення анатазу.

Хлорний спосіб. Руда титану обробляється хлором і подальше окислюється для отримання діоксиду титану. Хлорний спосіб зазвичай призводить до отримання рутильних форм пігментів.

Обидва методи мають свої переваги та обмеження, і вибір між ними може залежати від економічних, технічних та екологічних факторів. Анатаз та рутиль можуть бути отримані як за допомогою сульфатного, так і хлорного способів виробництва діоксиду титану.

У порівнянні з сульфатним методом, хлорний спосіб може вважатися більш екологічно чистим і ефективним завдяки кільком факторам. Хлорний метод може бути виконаний в безперервному режимі, що дозволяє забезпечити високу автоматизацію виробництва. Це може підвищити продуктивність, знизити витрати енергії та забезпечити стабільність процесу. Споживання хлору в процесі може бути меншим у порівнянні з великою кількістю сульфатної кислоти, що використовується в сульфатному методі. Це може зменшити викиди та вплив на навколишнє середовище. Використання високих температур у хлорному методі може сприяти ефективному конвертуванню руди в діоксид титану та його подальшій обробці.

Однак, як і у всякій технології, хлорний метод має свої недоліки. По-перше, хлорний метод може бути вибіркоким до якості та складу сировини, що використовується. Це може обмежити можливості використання різних типів руд. По-друге, високі температури і використання хлору можуть призводити до зносу та корозії обладнання. Тому необхідне використання корозійностійких матеріалів.

У будь-якому випадку вибір між сульфатним і хлорним методами залежить від конкретних умов виробництва, доступності сировини, екологічних стандартів і технічних можливостей підприємства.

Сульфатний спосіб виробництва діоксиду титану включає три основних етапи: видобуток та обробка сировини, сульфатування та гідроліз.

Видобуток та обробка сировини. Зазвичай використовується руда титану, така як ілменіт або рутиль, яка містить оксид титану. Руда піддається різним процесам очищення, включаючи подрібнення, перемивання та флотацію для видалення забруднень.

Сульфатування. Очищена руда піддається конверсії в сульфат титану за допомогою сульфатної кислоти. Цей процес може включати обробку руди при підвищених температурах та тиску. Сульфат титану виділяється з розчину, а відходи можуть бути відокремлені.

Гідроліз сульфату. Сульфат титану піддається гідролізу, що призводить до утворення гідрата діоксиду титану. Гідрат діоксиду титану піддається подальшій обробці та кальцинуванню, щоб отримати чистий діоксид титану. Чистий діоксид титану може бути використаний як пігмент у різних галузях, зокрема у фарбах, лаках, пластику, папері та інших продуктах.

Ці етапи є загальними кроками сульфатного виробництва діоксиду титану, і вони можуть варіювати в залежності від конкретної технології та умов виробництва на конкретному заводі. Крім того, можуть використовуватися додаткові процеси для оптимізації виробництва та поліпшення якості кінцевого продукту.

Твердофазний метод розкладання ільменіту сірчаною кислотою дійсно вирізняється своєю ефективністю та швидкістю в порівнянні з іншими варіантами, такими як рідиннофазний і середньофазний.

Розкладання ільменіту відбувається при контакті ільменіту (FeTiO_3) з сірчаною кислотою (H_2SO_4) у твердій фазі. Процес зазвичай проводять при високих температурах і тиску. Твердофазний метод дозволяє швидко розкласти ільменіт, що сприяє високій продуктивності процесу. Цей метод сприяє отриманню розчинів більшої основності, що полегшує проведення I гідролізу та отримання високоякісного кінцевого продукту.

Твердофазний метод має широке застосування в промисловості при виробництві діоксиду титану. Він дозволяє ефективно використовувати ільменітові концентрати для отримання високоякісного продукту. Температура та тиск у твердофазному методі можуть варіюватися в залежності від конкретної технології та обладнання. Хоча твердофазний метод є переважаючим у промисловості через свою ефективність, важливо враховувати, що вибір конкретного методу може за-

лежати від ряду факторів, таких як склад сировини, обладнання, витрати енергії і вимоги до якості кінцевого продукту.

Для розкладання ільменіту в твердофазному методі застосовується концентрована сірчана кислота. Це дозволяє швидко підвищити температуру реакційної суміші і забезпечити ефективний розклад ільменіту.

У концентровану сірчану кислоту додають ільменіт для початку процесу розкладання. Концентрована кислота дозволяє швидко підвищити температуру реакційної суміші. Температуру реакційної суміші тримають у діапазоні 190–220°C. Регулювання температури може виконуватися додаванням води або гідролізної кислоти. Розкладання ільменіту відбувається при високих температурах у присутності концентрованої сірчаної кислоти. Після розкладання ільменіту отримують розчин сульфату титану, який містить розчинені титанові солі. Додаткові кроки гідролізу можуть бути використані для отримання чистого діоксиду титану. Гідроліз – це хімічний процес, в якому сполуки взаємодіють з молекулами води, що призводить до утворення гідроксидів або гідратів. У випадку отримання гідратів сульфату титану кінцевий продукт має високий показник дисперсності, що є важливим для багатьох застосувань, зокрема в області фарб, лаків та пластмас.

Під час гідролізу утворюється метатитанова кислота, яка виділяється в осаді:

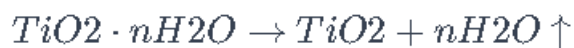


Важливо, що гідроліз дає метатитанову кислоту і діоксид титану. Утворена метатитанова кислота сорбує значну кількість SO₃ (діоксид сірки). Цей етап може слугувати для очищення від домішок та забруднень.

Метатитанову кислоту промивають для видалення забруднень. Після промивання проводять сушіння. Затим відбувається прожарювання, де видаляється вода і SO₃.

Отримання діоксиду титану:

- при температурі 200–300°C відбувається видалення води



- при температурі 500–800°C видаляється SO₃



- при температурі 850–900°C виходить нейтральний продукт – діоксид титану



Отриманий діоксид титану може використовуватися в різних галузях промисловості, таких як фарби, лаки, пластмаси та інші. Сірчано-кислотний метод часто вимагає багатостадійних процесів, що може зробити виробництво більш складним та витратним. Велика витрата сірчаної кислоти може бути неекономічною, особливо якщо врахувати непродуктивне витрачання на утворення сульфатів заліза та інших відходів.

Утворення великої кількості сульфату заліза у відходах може призводити до екологічних проблем та вимагати високих витрат на їх обробку та утилізацію. А великі витрати гідролізої сірчаної кислоти, яка може бути розведеною та забрудненою домішками, можуть зробити процес менш ефективним та вимагати додаткових витрат на обробку.

Хлорний метод отримання діоксиду титану є одним з основних промислових методів виробництва. Основною сировиною у цьому процесі є тетрахлорид титану (TiCl₄). Далі розглянемо два основні способи отримання діоксиду титану з тетрахлориду титану:

1. Метод гідролізу тетрахлориду титану.

Тетрахлорид титану взаємодіє з водяною парою або водним розчином, що призводить до утворення діоксиду титану та хлоридів.

Реакція гідролізу:



Отриманий діоксид титану може піддаватися подальшій обробці для отримання бажаних властивостей.

2. Метод спалювання тетрахлориду титану при високій температурі:

Тетрахлорид титану може бути спалюваний при високих температурах, використовуючи кисень чи повітря, що призводить до утворення діоксиду титану та виділення хлоридів.

Реакція спалювання:



Цей метод також може бути використаний для отримання діоксиду титану в промисловому масштабі.

Проблема використання утворених при гідролізі хлориду водню або соляної кислоти, яка виникає при виробництві титанових пігментів методом гідролізу, є серйозним завданням. Промисловість продовжує вдосконалювати технології та розробляти методи, які б дозволяли більше ефективно вирішити цю проблему.

Розробка методів, які використовують менш агресивні реагенти або альтернативні хімічні підходи, може зменшити утворення хлориду водню або соляної кислоти. Також виконуються дослідження можливості регенерації хлориду водню або соляної кислоти для повторного використання може бути одним із напрямків розв'язання проблеми.

У сульфатному способі виробництва діоксиду титану не потрібно проводити додаткову поверхневу обробку сполуками кремнію і алюмінію. Це може спростити технологічний процес та зменшити витрати. У порівнянні з хлорним способом, сульфатний спосіб може використовувати менш агресивні реагенти, що може

вплинути на безпеку та вартість виробництва. Також сульфатний спосіб дозволяє отримати різні варіанти діоксиду титану, що може відкривати можливості для застосування в різних виробництвах.

Тому в даній кваліфікаційній роботі застосовуємо сульфатний спосіб виробництва діоксиду титану.

1.2 Модернізація випарного апарату

Багаторазове використання енергоносіїв є ефективним методом зниження енерговитрат у технологічних процесах. У нашій проектній розробці це досягається шляхом повторного використання гріючої пари. Давайте розглянемо, як цей процес може відбуватися в стандартних технологічних схемах.

1. Упарювання розчину:

Розчин, який потрібно концентрувати, піддається упарюванню в теплообміннику. Під час цього процесу температура розчину підвищується, а розчин утворюється у пароподібному стані.

2. Теплообмінник з гріючою парою:

Упарюваний розчин подається до теплообмінника, де його нагрівають за рахунок насиченої пари, яка надходить від теплової електростанції. Температура пари забезпечує підігрів розчину до температури кипіння.

3. Конденсація пари:

Після теплообміну пара конденсується, віддаючи своє тепло упарюванню розчину. Конденсована вода повертається у водяну пару у ТЕЦ для подальшого використання.

4. Повторний цикл:

Конденсована вода, яка вийшла з пари, знову стає гріючою парою у ТЕЦ та використовується для подальшого підігріву нової партії упарюваного розчину.

Цей цикл дозволяє зберігати тепло та енергію, зменшуючи при цьому споживання енергоресурсів та забезпечуючи економічні вигоди. При правильному

проектуванні і налагодженні системи такий підхід може бути досить ефективним у виробництві та концентрації розчинів.

Таким чином, ефективне використання тепла пари та конденсату у випарній установці – це сучасний та перспективний підхід, спрямований на економію енергоресурсів та підвищення енергоефективності процесу. Тепло, вироблене під час випарювання розчину, може бути використане для підігріву вихідного розчину. Це сприяє економії енергії та зниженню витрат на нагрів.

Застосування конденсату та тепла випареного розчину може зменшити залежність від зовнішнього джерела гріючої пари, зменшуючи тим самим витрати на енергію. Ефективне використання тепла може допомогти зменшити обсяг викидів в атмосферу, що є позитивним аспектом з екологічної точки зору.

Загалом, цей підхід дозволяє заощаджувати енергію та зменшувати витрати на енергоресурси. Цей напрямок розвитку технологій впроваджується у багатьох галузях промисловості з метою створення більш ефективних та сталих виробничих процесів.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис технологічної схеми виробництва

Багатокорпусні випарні апарати є складнішими за конструкцією порівняно з однокорпусними, але вони можуть мати свої переваги у відповідних умовах виробництва. Розчин проковзує через послідовно з'єднані корпуси, де кожен наступний корпус обігривається вторинною парою, що утворилася в попередньому корпусі. Це дозволяє використовувати тепло ефективно.

Такі апарати можуть мати меншу витрату первинної граючої пари на випарювання розчинів, оскільки вторинна пара, утворена в кожному корпусі, використовується для подальшого обігріву розчину в інших корпусах. Зі збільшенням числа корпусів знижується витрата первинної граючої пари, але одночасно зростає сумарна температурна депресія та зменшується робоча різниця температур.

Сумарна поверхня нагріву апарата збільшується разом із збільшенням числа корпусів. Але збільшення числа корпусів призводить до збільшення розмірів і вартості апарата, а також площі і кубатури виробничої будівлі, а також вимагає більше зусиль на обслуговування та ремонт.

Застосування багатокорпусних вакуум-випарних установок є доцільним у випадках, коли витрата гріючої пари в однокорпусних апаратах є дуже великою і становить значну частку собівартості кінцевого продукту. У багатокорпусних установках можна ефективно використовувати тепло, що утворюється в кожному корпусі, для обігріву наступного корпусу і для випарювання розчину. Цей підхід особливо ефективний у випадках, коли необхідно зменшити витрати енергії, а саме гріючої пари, і знизити собівартість виробництва. Проте, варто враховувати, що багатокорпусні установки мають свої технічні і експлуатаційні особливості, які потребують уважного планування і обслуговування.

Примусова циркуляція розчину в випарних апаратах є ефективним засобом запобігання інкрустації поверхні нагрівання при випарюванні розчинів, які можуть

утворювати кристали. Цей процес забезпечує постійний рух розчину через апарат, уникнення стагнації і відкладення твердих часток на поверхнях обладнання.

Примусова циркуляція може бути реалізована за допомогою насосів або інших механізмів, які забезпечують потік розчину через теплообмінні елементи. Це особливо важливо при випарюванні розчинів, які мають тенденцію до утворення кристалів або інших твердих відкладень. Примусова циркуляція допомагає зберегти ефективність теплообміну, забезпечує рівномірне розподілення тепла і уникнення проблем, пов'язаних з утворенням відкладень на поверхнях апарата.

Розчин TiO_2 слабо кристалізується і не має тенденції до утворення значних відкладень. Тому використання природної циркуляції розчину може бути ефективним рішенням. Природна циркуляція базується на різниці густини розчину при нагріванні та охолодженні. У такому випадку, розчин самопливе вгору при нагріванні і вниз при охолодженні, що створює природний потік. Цей процес може бути достатнім для забезпечення потрібної циркуляції в системі без використання додаткових механізмів чи насосів [1, 2].

На підставі проведеного аналізу робимо висновок, що однокорпусні вакуум-випарні трубчасті установки з винесеною гріючою камерою можуть бути ефективними для випарювання розчинів, а природна циркуляція може зменшити енерговитрати та спростити систему без потреби у складних механізмах циркуляції. Саме такий тип установок може забезпечити ефективний теплообмін та концентрування розчину TiO_2 . Технологічна схема такої установки наведена на рис. 2.1.

Розчин, який вийшов з проміжної ємності E1, подається в теплообмінник П і підігрівається до температури, близької до температури кипіння. Це типова операція в процесах випарювання, де теплообмін відбувається для підготовки розчину до етапу випарювання. Теплообмінник може мати різні конструкції, такі як пластинчатий, трубчастий або інші, залежно від технічних вимог та параметрів процесу. Його основна функція – передача тепла з нагрітої частини системи (наприклад, випарювача) до подавального розчину, щоб підігріти його до потрібної температури.

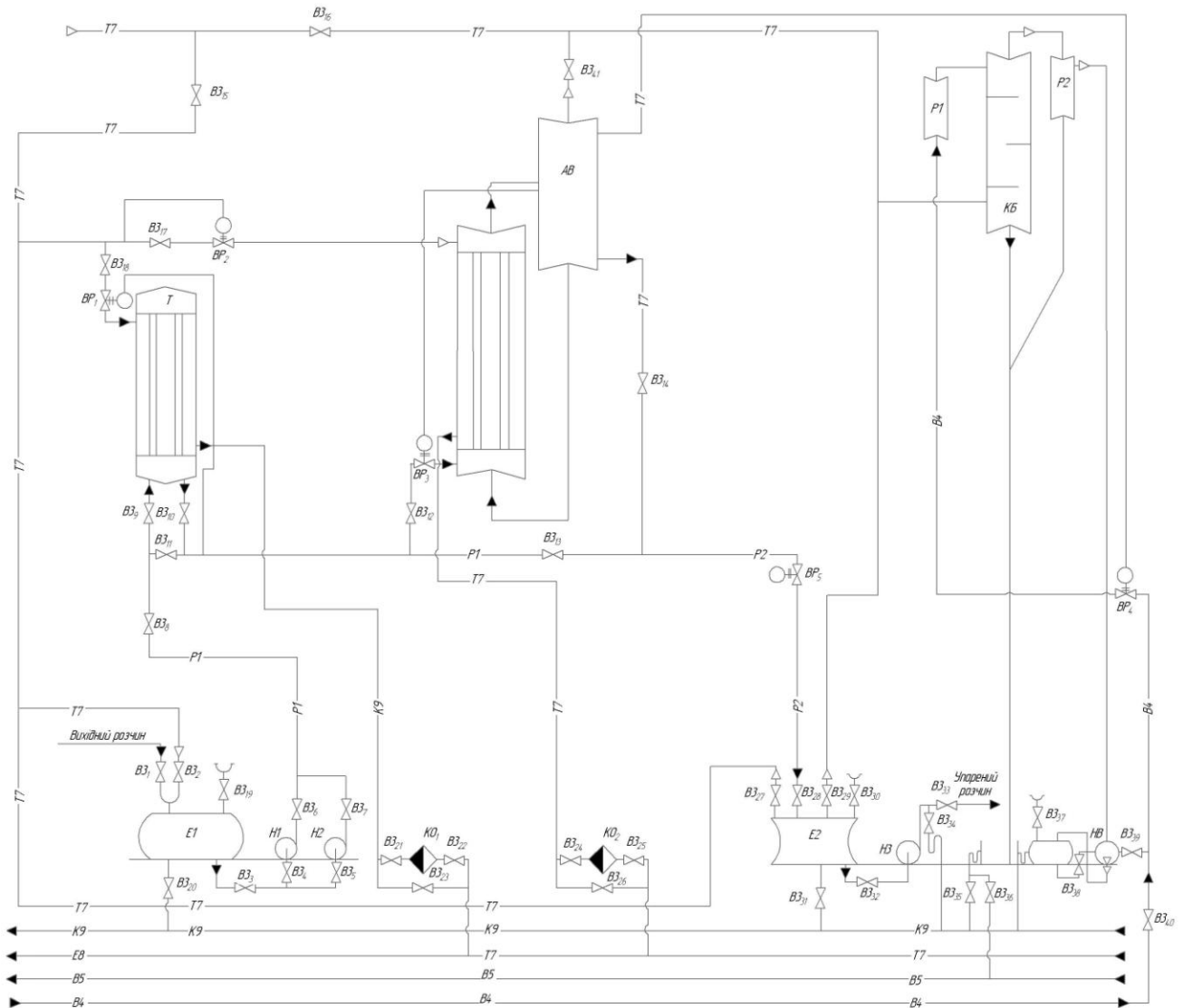


Рисунок 2.1 – Схема однокорпусної вакуум-випарної установки

Далі підігрітий розчин подається в корпус випарної установки, а підтримання вакууму здійснюється за допомогою барометричного конденсатора змішання КБ та вакуум-насоса НВ.

Випарна установка – це місце, де відбувається фактичний процес випарювання розчину. Підігрітий розчин введений у цей корпус для подальшого випарювання, де здійснюється видалення розчинника.

Барометричний конденсатор змішання (КБ) використовується для створення вакууму. Він може включати систему конденсації і рециркуляції газів для підтримання вакуумного тиску в системі. Робочі принципи можуть включати охоло-

дження газів, їх конденсацію та відсмоктування. Вакуум-насос використовується для відсмоктування газів і підтримання вакууму у системі. Гази, що утворюються в процесі випарювання, видаляються за допомогою вакуум-насоса.

Правильне підтримання вакууму може бути важливим для оптимізації процесу випарювання, забезпечення ефективного видалення розчинника та контролю параметрів процесу.

Суміш охолоджуючої води і конденсату виводиться з конденсатора за допомогою барометричної труби з гідрозатворів. Цей конденсат і охолоджуюча вода, можливо, використовуються для охолодження та конденсації газів, що утворюються в процесі випарювання.

Розчин, що був відцентрований і сконцентрований, подається на охолодження в холодильник. Це може бути необхідно для контролю температури та стабілізації розчину перед його повторним введенням в процес. Після проходження процесу охолодження у холодильнику концентрований розчин може бути направлений до проміжної ємності упареного розчину. Це може бути наступним етапом для подальшого випарювання.

2.2 Теоретичні основи процесу випарювання [9–15]

Зниження температури кипіння розчину порівняно з температурою кипіння чистого розчинника при тому ж тиску називається **підняттям температури кипіння** (або також відоме як **підняття тиску**). Це сталося через зниження тиску пари над розчином, що спричинюється взаємодією частинок розчинника та розчинених частинок.

Розчин, що містить TiO_2 , матиме температуру кипіння вище, ніж температура кипіння чистої води під тим же тиском. Це має значення при випарюванні розчинів, оскільки це може впливати на ефективність теплового обміну та інші параметри процесу.

Випарювання під вакуумом має кілька переваг:

- 1. Можливість проводити процес при низьких температурах.** Вакуум дозволяє випарювати розчини при більш низьких температурах, що важливо для речовин, схильних до розкладання при високих температурах.
- 2. Збільшення корисної різниці температур.** Розрідження у вакуумі дозволяє збільшити корисну різницю температур, що використовується для випарювання. Це може призводити до зменшення поверхні нагріву апарата та ефективнішого використання гріючого агента.
- 3. Використання вторинної пари.** Випарювання під вакуумом дозволяє використовувати вторинну пару, вироблену самою випарною установкою, як гріючий агент, що може покращити енергоефективність процесу.

Ці переваги роблять вакуумне випарювання ефективним методом для концентрації розчинів, особливо для тих, які вимагають дбайливого підходу до умов обробки.

Найбільш поширені багатокорпусні випарні установки. Оскільки вторинна пара кожного попереднього корпусу направляється в якості гріючої в наступний корпус, це дозволяє значно економити первинну пару, яка використовується тільки для обігріву першого корпусу. Загальна витрата пари може бути значно зменшена. Тиск у послідовно з'єднаних корпусах знижується, щоб забезпечити різницю температур, необхідну для випарювання розчину. Це може мати важливе значення для обробки розчинів, які вимагають конкретних умов. Зменшення тиску в кожному наступному корпусі дозволяє забезпечити оптимальні умови температури для випарювання розчину. Це особливо важливо для розчинів, які можуть реагувати або розкладатися при високих температурах.

Багатокорпусні установки часто дозволяють досягти більшої ефективності процесу в порівнянні з однокорпусними установками тієї ж продуктивності, оскільки вони можуть працювати при меншій витраті енергії.

За відносним рухом гріючої пари і випарюваного розчину випарні установки класифікуються наступним чином:

1. Прямоточні випарні установки:

- підходять для розчинів з високою температурною депресією;
- випарований розчин рухається в тому ж напрямку, що і гріюча пара.

2. Протиточні випарні установки:

- використовуються для розчинів із значною в'язкістю, яка зростає з підвищенням концентрації;
- між ступенями розташовані насоси для подолання в'язкості розчину.

3. Установки з паралельним живленням:

- підходять для розчинів, які легко кристалізуються;
- дозволяють уникнути кристалізації в установці.

4. Установки з відпусткою частини вторинних парів споживачам – частина вторинних парів відпускається для використання в інших процесах.

5. Випарні установки зі змішаним живленням корпусів:

- використовуються для розчинів з підвищеною в'язкістю;
- живлення корпусів здійснюється змішаною гріючою парою.

Різниця між температурами кипіння розчину (t) і чистого розчинника (t_r) називається **температурною депресією**

$$\Delta' = t - t_r. \quad (2.1)$$

Температурна депресія залежить від властивостей розчиненої речовини і розчинника. Характеристики обох речовин, такі як масова частка, молекулярна маса, міжмолекулярні сили і т. д., можуть впливати на температурну депресію. Зі збільшенням концентрації розчиненої речовини температурна депресія може зростати. Підвищення тиску також може призводити до збільшення температурної депресії.

Якщо відома температурна депресія при атмосферному тиску $\Delta_{атм}$, можна знайти депресію і при інших тисках за наближеною формулою:

$$\Delta' = 16,2 \cdot \frac{T^2}{r} \cdot \Delta_{атм}, \quad (2.2)$$

де T і r – відповідно абсолютна температура кипіння (в К) і теплота випарювання (в Дж/кг) для води при даному тиску.

Підвищення температури кипіння розчину дійсно визначається не лише температурною депресією, але також іншими факторами, такими як гідростатична та гідравлічна депресії.

Температурна депресія – зменшення тиску над розчином (особливо під час випарювання під вакуумом) призводить до підвищення температури кипіння розчину порівняно з його чистим станом.

Гідростатична депресія – збільшення глибини рідинного стовпа також може впливати на температуру кипіння. Глибокі резервуари мають вищий гідростатичний тиск на дно, що може збільшувати температуру кипіння розчину.

Гідравлічна депресія – велика швидкість потоку розчину через трубопровід також може призводити до гідравлічної депресії, яка може впливати на температуру кипіння.

Повна депресія Δ дорівнює сумі температурної, гідростатичної і гідравлічної депресій:

$$\Delta = \Delta' + \Delta'' + \Delta'''. \quad (2.3)$$

Температура кипіння розчину t визначається у залежності від температури насичення вторинної пари t_r , за формулою

$$t = t_r + \Delta. \quad (2.4)$$

У випарювальних процесах рушійною силою є різниця температур між гріючою парою і температурою кипіння розчину. Ця температурна різниця визначає

парціальний тиск парів розчинника в розчині, що є ключовим параметром у випарювальному процесі.

Додатково, важливим фактором є масообмін, який відбувається під час фазових переходів розчинника (рідини) в парову фазу та розчиненої речовини (розчину) в тверду фазу (кристалізація). Цей процес може бути управліним різницею у фактичних концентраціях розчиненої речовини в розчині і концентрації, яку вона могла б мати при насиченні при даній температурі.

2.3 Пристрій і принцип дії проектованого апарата

У хімічній промисловості існує велика кількість випарних апаратів різної конструкції. Вони можуть бути класифіковані за 6 ознаками, а саме:

1. За розташуванням поверхні нагрівання:

- Горизонтальні. Апарати, де поверхня нагрівання розташована горизонтально. Зазвичай використовують для обробки розчинів з великою теплоємністю.
- Вертикальні. Поверхня нагрівання розташована вертикально. Застосовують для різних видів розчинів і сипучих матеріалів.
- Похилі. Рідше зустрічаються, але можуть використовуватися для специфічних завдань.

2. За родом теплоносія:

- З паровим обігрівом. Використовують пару як теплоносій.
- З газовим обігрівом. Теплоносій - газ.
- Обігрів високотемпературними теплоносіями. Використовують високотемпературні рідини, такі як масла чи вода під високим тиском.
- З електрообігрівом. Тепло генерується електричними обігрівачами.

3. За способом підведення теплоносія:

- З подачею теплоносія всередину трубок. Теплоносій подається всередину трубок, і випарювання відбувається всередині трубок.

- подача пари в парову камеру зовні трубок. Пара подається зовні трубок, і випарювання відбувається у великому об'ємі.
- 4. За режимом циркуляції:
 - Природна циркуляція. Обігрівання відбувається внаслідок природного руху теплоносія.
 - Примусова циркуляція. Використовують насоси для примусової циркуляції теплоносія.
- 5. За кратністю циркуляції:
 - Одноразова. Циркуляція теплоносія відбувається один раз.
 - Багаторазова. Теплоносій циркулює багаторазово.
- 6. За типом поверхні нагрівання:
 - З паровою сорочкою. Поверхня нагрівання має форму сорочки або рубашки.
 - Змієвикові. Використовують змієвики для теплообміну.
 - З трубчастою поверхнею нагріву. Трубки використовуються для передачі тепла. Мають різні конфігурації.

Проектований апарат з виносною гріючою камерою і довгими кип'ятильними трубами, які сягають 7 метрів, призначений для роботи при більш інтенсивній природній циркуляції (рис. 2.2). Виносна гріюча камера дозволяє встановити нагрівальний елемент поза корпусом апарата, що може полегшити доступ і обслуговування. Також це може забезпечити оптимальне розташування для підвищення ефективності теплообміну.

Довжина кип'ятильних труб у 7 метрів свідчить про збільшену поверхню теплообміну, що може призвести до підвищення ефективності процесу випарювання.

Інтенсивна природна циркуляція обумовлена відсутністю обігріву циркуляційної труби та великою висотою підйомної і опускної ділянок контуру. При цьому теплоносій (напевно, рідина) самостійно циркулює без використання додаткових пристроїв, таких як насос.

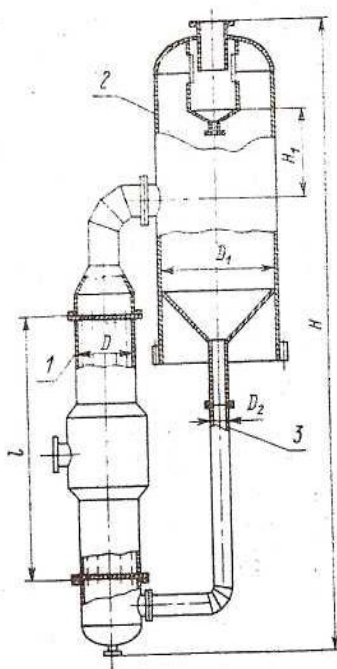


Рисунок 2.2 – Випарний апарат з природною циркуляцією і винесеною гріючою камерою: 1 – гріюча камера; 2 – сепаратор; 3 – циркуляційна труба

Саме можливість працювати з інтенсивною природною циркуляцією може дозволити оптимізувати тепловий режим процесу випарювання з врахуванням конкретних вимог виробництва. А висока висота підйомної і опускної ділянок контуру сприяє створенню потужної рушійної сили для природної циркуляції.

Зовнішня гріюча камера, яку можна легко відділити від корпусу апарата, має декілька переваг та можливостей. Це полегшує її очищення та проведення ремонтних робіт, а також забезпечує швидкий доступ для технічного обслуговування без повної зупинки апарата. Ревізію та ремонт гріючої камери можна виконувати без повної зупинки апарата, що дозволяє підтримувати продуктивність на прийнятному рівні під час технічних обслуговувальних заходів.

Приєднання до корпусу двох гріючих камер може підвищити ефективність апарата. Застосування двох гріючих камер може бути особливо корисним у випадках, коли одну з камер можна відключити для технічного обслуговування, а інша продовжує працювати, уникнувши повної зупинки процесу.

Вихідний розчин подається під нижню трубку решітку нагрівальної камери. Розчин, піднімаючись по кип'ятільним трубам, випаровується під впливом тепла, яке надходить з зовнішньої гріючої камери. Вторинна пара, яка утворилася при випаровуванні, відокремлюється від рідини у сепараторі. Рідина, що залишилася після відокремлення пари, опускається по поверхні циркуляційної труби, яка не обігривається. Опускаючись, рідина змішується з вихідним розчином, і цикл циркуляції повторюється знову.

Вторинна пара, пройшовши бризкоуловлювач, видаляється зверху сепаратора. Упарений розчин відбирається через бічний штуцер в кінці дніщі сепаратора.

Апарати з виносною гріючою камерою володіють високою швидкістю циркуляції, досягаючи значення 1,5 м/с. Це дозволяє їм випарювати концентровані розчини, не боячись швидкого забруднення поверхні теплообміну. Вони виявилися універсальними, зручними в експлуатації та мають високу теплопередачу. Такі апарати широко застосовуються завдяки своїм перевагам, і їхнє поширення може бути пов'язане з високою продуктивністю та ефективністю в процесах випарювання.

2.4 Технологічні розрахунки

Під час випарювання розчину відбувається ефект випаровування води, проте кількість розчиненої речовини у вихідному розчині і концентрованому розчині залишається сталою. Отже, матеріальний баланс у цьому процесі може бути виражений через наступні рівняння:

$$G_n = G_k + W; \quad (2.5)$$

$$G_n x_n = G_k x_k, \quad (2.6)$$

де G_n , G_k – відповідно масові витрати початкового (вихідного) розчину і кінцевого (упареного) розчину, кг/с;

x_n , x_k – масові частки розчиненої речовини в початковому і кінцевому розчині, %;

W – масова витрата випаровуваної води, кг/с.

З рівнянь матеріального балансу визначаємо масову витрату випаровуваної води:

$$W = G_n \left(1 - \frac{x_n}{x_k} \right). \quad (2.7)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$W = 5,4 \cdot \left(1 - \frac{0,128}{0,2} \right) = 1,71 \text{ кг/с.}$$

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості водного розчину діоксиду титану, гріючої водяної пари і охолоджувальної води

Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
1	2	3	4
1. Хімічна формула	–	–	TiO ₂
2. Густина 20% -го водного розчину TiO ₂	ρ	кг/м ³	1610
3. Початкова концентрація розчину	x_n	%	12,8
4. Кінцева концентрація розчину	x_k	%	20
5. Температура вихідного розчину	t_n	°C	30
6. Температура охолоджуючої води	$t_{\text{води}}$	°C	15
7. Температура охолодженого упареного розчину	$t_{\text{охл}}$	°C	35

Продовження табл. 2.1

8. Тиск гріючої пари (надлишковий)	P	МПа	0,1
9. Тиск пари в барометричному конденсаторі (вакуум)	P_0	МПа	0,011
10. Температура гріючої пари	$t_{г.п.}$	°С	100
11. Продуктивність	G_H	кг/с	5,4
12. Ентальпія граючої пари	$I_{г.п.}$	кДж/кг	2679
13. Ентальпія пари в барометричному конденсаторі	I_0	кДж/кг	2632

З рівнянь матеріального балансу визначаємо масову витрату кінцевого (упареного) розчину:

$$G_k = G_H - W; \quad (2.8)$$

$$G_k = \frac{G_H x_H}{x_k}; \quad (2.9)$$

$$G_k = 5,4 - 1,71 = 3,046 \text{ кг/с};$$

$$G_k = \frac{5,4 \cdot 0,128}{0,2} = 3,046 \text{ кг/с}.$$

Під час визначення температури кипіння розчинів у випарних апаратах припускаються наступні передбачення. Розподіл концентрацій розчину у випарному апараті з інтенсивною циркуляцією практично відповідає моделі ідеального перемішування. Тому концентрацію киплячого розчину приймають рівною кінцевій концентрації в даному корпусі, і, отже, температуру кипіння розчину визначають при цій кінцевій концентрації.

Зміна температури кипіння по висоті кип'ятильних труб відбувається через зміну гідростатичного тиску стовпа рідини. Температуру кипіння розчину в корпусі приймають відповідно до температури кипіння в середньому шарі рідини. Таким чином, температура кипіння розчину в корпусі відрізняється від температури гріючої пари на величину температурних втрат, включаючи температурну, гідростатичну і гідравлічну депресії.

Гідравлічна депресія обумовлена втратою тиску пари на подолання гідравлічних опорів трубопроводів. За практичними даними величину гідравлічної депресії приймають рівною $0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$ на корпус. Приймаємо величину гідравлічної депресії рівною $\Delta t_{г.с.} = 1^\circ\text{C}$.

Знаючи величину гідравлічної депресії, визначаємо температуру гріючої пари в сепараторі випарного апарата з рівняння:

$$t_1 = t_0 + \Delta t_{г.с.}, \quad (2.10)$$

де t_0 – температура пари в барометричному конденсаторі, $^\circ\text{C}$;
 $\Delta t_{г.с.}$ – величина гідравлічної депресії, $^\circ\text{C}$.

$$t_1 = 55 + 1 = 56^\circ\text{C}.$$

Знаючи температуру гріючої пари в сепараторі, за довідковими даними знаходимо тиск в паровому просторі сепаратора, який дорівнює $P_1 = 0,011$ МПа [4].

За довідковими даними знаходимо, що 20%-ий водний розчин TiO_2 під атмосферним тиском $P'_1 = 101300$ Па кипить при температурі $110,6^\circ\text{C}$. При цій температурі тиск насиченої пари води становить $P'_B = 146\,460$ Па [5].

Визначаємо відношення тисків пари над розчином і води при одній і тій же температурі $110,6^\circ\text{C}$:

$$\left(\frac{P'_1}{P'_B} \right)_{110,6} = \frac{101300}{146460} = 0,69. \quad (2.11)$$

Для шуканої температури кипіння розчину при $P_1 = 0,011$ МПа визначимо тиск води:

$$\left(\frac{P_1}{P_B}\right)_t = \frac{0,041}{P_B} = 0,69, \quad (2.12)$$

звідки

$$P_B = \frac{0,011}{0,69} = 0,017 \text{ МПа},$$

чому відповідає за довідковими даними температура кипіння води 57°C . Цю ж температуру кипіння матиме і 20%-ий водний розчин TiO_2 при тиску над розчином $P_1 = 0,011$ МПа [4].

Гідростатична депресія обумовлена різницею тисків в середньому шарі киплячого розчину і на його поверхні. Тиск в середньому шарі киплячого розчину визначається за рівнянням:

$$P_{\text{cp}} = \frac{P_1 + \rho g H (1 - \varepsilon)}{2}, \quad (2.13)$$

де P_1 – тиск пари в паровому просторі сепаратора, Па;
 ρ – щільність киплячого розчину, кг/м^3 ;
 g – прискорення вільного падіння, $\text{м}^2/\text{с}$;
 H – висота кип'ятильних труб в апараті, м;
 ε – питома об'ємна частка пари в киплячому розчині, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Для вибору значення висоти кип'ятильних труб апарата необхідно орієнтовно оцінити поверхню теплопередачі випарного апарата. При кипінні водних розчинів для апаратів з природною циркуляцією по практичним даним величина питомого теплового навантаження дорівнює $20000\text{--}50000$ Вт/м^2 . Приймаємо питоме теплове навантаження рівним $q = 40000$ Вт/м^2 .

Тоді поверхня теплопередачі апарата орієнтовно складе:

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q}{q} = \frac{W \cdot r_1}{q}, \quad (2.14)$$

де Q – теплове навантаження, Вт;

W – масова витрата води, що випаровується, кг/с;

q – питома теплове навантаження, Вт/м²;

r_1 – теплота пароутворення гріючої пари в сепараторі при тиску $P_1 = 0,011$ МПа; за довідковими даними $r_1 = 2368,2$ кДж/кг [4].

$$F_{\text{оп}} = \frac{1,71 \cdot 2368,2 \cdot 10^3}{40000} = 101,24 \text{ м}^2.$$

Трубчаті апарати з природною циркуляцією і винесеною гріючою камерою при $F_{\text{оп}} = 112 \text{ м}^2$ складаються з кип'ятильних труб висотою 4 і 5 м при діаметрі $d_{\text{н}} = 38$ мм і товщиною стінки $\delta_{\text{ст}} = 2$ мм. Приймаємо висоту кип'ятильних труб 5 м.

При бульбашковому (ядерному) режимі кипіння за практичними даними паронаповнення становить 0,4–0,6. Приймаємо паронаповнення рівним $\varepsilon = 0,5$. Густина 20 %-го водного розчину TiO_2 при температурі 20 °С за довідковими даними $\rho = 1610$ кг/м³ [5].

При визначенні густини розчину в корпусі нехтуємо зміною її з підвищенням температури від 20 °С до температури кипіння через мале значення коефіцієнта об'ємного розширення і орієнтовно прийнятого значення ε .

Гідростатичний тиск в середньому шарі кип'ятильних труб корпусу:

$$P_{\text{сп}} = \frac{0,011 \cdot 10^6 + 1610 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot (1 - 0,5)}{2} = 43013 \text{ Па} = 0,043 \text{ МПа}.$$

Температура кипіння води при тиску $P_{\text{ср}} = 0,043$ МПа за довідковими даними становить $t_{\text{ср}} = 79$ °С [4].

Визначаємо гідростатичну депресію за рівнянням:

$$\Delta t_{\text{г.эф.}} = t_{\text{ср}} - t_1, \quad (2.15)$$

де $t_{\text{ср}}$ – температура кипіння води при гідростатичному тиску, °С;
 t_1 – температура гріючої пари в сепараторі випарного апарата, °С.

$$\Delta t_{\text{г.эф.}} = 79 - 56 = 23 \text{ } ^\circ \text{С.}$$

Загальна сума температурних депресій (втрат) складе:

$$\sum \Delta t_{\text{пот}} = \Delta t_{\text{г.с.}} + \Delta t_{\text{г.эф.}}, \quad (2.16)$$

де $\Delta t_{\text{г.с.}}$ – величина гідравлічної депресії, °С;
 $\Delta t_{\text{г.эф.}}$ – величина гідростатичної депресії, °С.

$$\sum \Delta t_{\text{пот}} = 1 + 23 = 24 \text{ } ^\circ \text{С.}$$

Температура кипіння розчину завжди вища, ніж температура кипіння чистого розчинника при тому ж тиску. Це явище відбувається через тиск пари розчину, який завжди нижчий, ніж тиск пари чистого розчинника при тій самій температурі. Таким чином, для досягнення кипіння розчину потрібна вища температура.

Цей ефект стає особливо важливим при випарюванні розчинів, оскільки температура кипіння впливає на ефективність і параметри процесу.

Знаючи показники температурних депресій, визначаємо температуру кипіння розчину на середньому рівні кип'ятільних труб за формулою:

$$t_{\text{кип}} = t_0 + \Delta t_{\text{г.с.}} + \Delta t_{\text{г.еф.}}, \quad (2.17)$$

де t_0 – температура пари в барометричному конденсаторі, °С;

$\Delta t_{\text{г.с.}}$ – величина гідравлічної депресії, °С;

$\Delta t_{\text{депр}}$ – величина концентраційної депресії, °С;

$\Delta t_{\text{г.еф.}}$ – величина гідростатичної депресії, °С.

Підставивши значення, отримаємо:

$$t_{\text{кип}} = 55 + 1 + 23 = 79^\circ\text{С}.$$

Співвідношення температур в однокорпусній вакуум-випарній установці повинно задовольняти наступні умови:

$$t_{\text{г.п.}} > t_{\text{кип}} > t_{\text{ср}} > t_1 > t_0, \quad (2.18)$$

де $t_{\text{г.п.}}$ – температура гріючої пари, °С;

$t_{\text{кип}}$ – температура кипіння розчину на середньому рівні кип'ятільних труб, °С;

$t_{\text{ср}}$ – температура кипіння води при гідростатичному тиску, °С;

t_1 – температура гріючої пари в сепараторі випарного апарата, °С;

t_0 – температура пари в барометричному конденсаторі, °С.

Підставивши значення, отримаємо:

$$100 > 80 > 79 > 56 > 55,$$

що задовольняє необхідній умові.

Визначаємо загальну різницю температур за формулою:

$$\Delta t_{\text{общ}} = t_{\text{г.п.}} - t_0, \quad (2.19)$$

де $t_{г.п.}$ – температура гріючої пари, °С;
 t_0 – температура пари в барометричному конденсаторі, °С.

$$\Delta t_{\text{общ}} = 100 - 55 = 45 \text{ °С.}$$

Корисна різниця температур буде дорівнювати:

$$\Delta t_{\text{пол}} = \Delta t_{\text{общ}} - \sum \Delta t_{\text{пот}} ; \quad (2.20)$$

$$\Delta t_{\text{пол}} = t_{г.п.} - t_{\text{кип}} , \quad (2.21)$$

де $\Delta t_{\text{общ}}$ – загальна різниця температур, °С;
 $\sum \Delta t_{\text{пот}}$ – загальна сума температурних депресій, °С;
 $t_{г.п.}$ – температура гріючої пари, °С;
 $t_{\text{кип}}$ – температура кипіння розчину на середньому рівні кип'ятильних труб, °С.

$$\Delta t_{\text{пол}} = 45 - 24 = 21 \text{ °С;}$$

$$\Delta t_{\text{пол}} = 100 - 79 = 21 \text{ °С.}$$

Відповідно до принципової схеми однокорпусної випарної установки, розбавлений розчин, який був нагрітий до температури, близької до температури кипіння в теплообміннику, подається в корпус випарної установки.

Теплота, необхідна для кипіння (розпарювання) розчину, підводиться за допомогою водяної пари. Із огляду на усі втрати, що надходять (з розведеним розчином і водяною парою) і втрати теплоти в навколишній простір (з упареним розчином і вторинною парою на виході), отримуємо рівняння теплового балансу:

$$Q + G_n c_n t_n = G_k c_k t_k + WI_{\text{вп}} + Q_{\text{пот}} \pm Q_d , \quad (2.22)$$

де Q – витрата теплоти на випарювання, Вт;
 G_H, G_K – відповідно масові витрати початкового (вихідного) розчину і кінцевого (упареного) розчину, кг/с;
 c_H, c_K – відповідно питома теплоємність початкового (вихідного) і кінцевого (упареного) розчину, Дж/(кг·К);
 t_H, t_K – відповідно температура початкового розчину на вході в апарат і кінцевого на виході з апарата, °С;
 W – масова витрата води, що випаровується, кг/с;
 $I_{вп}$ – питома ентальпія вторинної пари на виході з сепараційного простору випарного апарата, Дж/кг;
 $Q_{пот}$ – витрата теплоти на компенсацію втрат у навколишнє середовище, Вт (при розрахунку випарних апаратів величину витрат теплоти на компенсацію втрат у навколишнє середовище зазвичай приймають у розмірі 3–5 %).
 Приймаємо $Q_{пот} = 5 \%$;
 Q_d – теплота дегідратації, Вт (зазвичай ця величина, у порівнянні з іншими статтями теплового балансу, мала і нею можна знехтувати).

Температуру початкового розчину на вході в апарат визначаємо за формулою:

$$t_H = t_1 + \Delta t'_{депр}; \quad (2.23)$$

$$t_H = 55 + 2 = 57^\circ \text{C}.$$

Визначаємо питому теплоємність початкового розчину за рівнянням:

$$c_H = 4190 \cdot (1 - x_H), \quad (2.24)$$

де x_H – масова частка розчиненої речовини в початковому розчині.

$$c_H = 4190 \cdot (1 - 0,128) = 3654 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Із рівняння теплового балансу випарного апарата визначаємо витрату теплоти на випарювання:

$$Q = G_H c_H (t_K - t_H) + W(I_{вп} - c_B t_K) + Q_{пот}, \quad (2.25)$$

$$Q = 1,05 \cdot [4,756 \cdot 3654 \cdot (79-57) + 1,71 \cdot (2644 \cdot 10^3 - 4190 \cdot 79)] = 4554415 \text{ Вт.}$$

Визначаємо витрату гріючої пари за формулою:

$$G_{г.п.} = \frac{Q}{x \cdot r_{г.п.}}, \quad (2.26)$$

де x – ступінь сухості гріючої пари, %.

$$G_{г.п.} = \frac{4554415}{0,95 \cdot 2100 \cdot 10^3} = 2,28 \text{ кг/с.}$$

Звідки питома витрата гріючої пари дорівнює:

$$d = \frac{G_{г.п.}}{W}; \quad (2.27)$$

$$d = \frac{2,28}{1,71} = 1,33 \text{ кг/кг.}$$

Мета теплового розрахунку гріючої камери випарного апарата полягає в розрахунку коефіцієнта теплопередачі. На основі основного рівняння теплопередачі проводиться визначення поверхні теплообміну гріючої камери. Це необхідно для вибору випарного апарата згідно з каталогом.

Тепловий розрахунок гріючої камери включає в себе ряд етапів:

1. **Визначення теплового потоку.** Розрахунок теплового потоку, що надходить або віддається в гріючій камері, залежно від специфікацій процесу.
2. **Оцінка коефіцієнта теплопередачі.** Визначення коефіцієнта теплопередачі для гріючої камери враховує такі фактори, як фізичні властивості матеріалів, характер течії середовища і теплові умови.
3. **Розрахунок поверхні теплообміну.** Використання основного рівняння теплопередачі для визначення необхідної поверхні теплообміну гріючої камери.
4. **Вибір випарного апарата.** На основі отриманих результатів проводиться вибір відповідного випарного апарата за каталогом з урахуванням теплових характеристик гріючої камери.

Коефіцієнт теплопередачі визначається за рівнянням адитивності термічних опорів:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.28)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки, Вт/(м²·К);

$\sum \frac{\delta}{\lambda}$ – сумарний термічний опір, (м²·К)/Вт;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячого розчину, Вт/(м²·К).

Приймемо, що сумарний термічний опір дорівнює термічному опору стінки $\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}$ і накипу $\frac{\delta_{н}}{\lambda_{н}}$. Термічний опір забруднень з боку пари не враховуємо.

Тоді отримаємо:

$$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{н}}{\lambda_{н}}, \quad (2.29)$$

де $\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}$ – термічний опір стінки, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$\frac{\delta_{н}}{\lambda_{н}}$ – термічний опір накипу, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

$$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,002}{25,1} + \frac{0,0005}{2} = 0,0003296 = 3,3 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки визначається за формулою:

$$\alpha_1 = 2,04 \cdot \sqrt[4]{\frac{r_1 \cdot \rho_p^2 \cdot \lambda_p^3}{\mu_p \cdot H \cdot \Delta t_1}}, \quad (2.30)$$

де r_1 – теплота конденсації гріючої пари, Дж/кг;

ρ_p – густина конденсату при середній температурі плівки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

λ_p – теплопровідність конденсату при середній температурі плівки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

μ_p – динамічна в'язкість конденсату при середній температурі плівки, Па·с;

H – висота кип'ятильних труб в апараті, м;

Δt_1 – різниця температур конденсації пари і стінки, $^{\circ}\text{C}$.

Середня температура плівки визначається за формулою:

$$t_{\text{пл}} = t_{\text{р.п.}} - \frac{\Delta t_1}{2}. \quad (2.31)$$

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки ведемо методом послідовних наближень. У першому наближенні приймемо $\Delta t_1 = 2^{\circ}\text{C}$.

Тоді:

$$t_{\text{пл}} = 100 - \frac{2}{2} = 99^{\circ}\text{C};$$

$$\alpha_1 = 2,04 \cdot \sqrt[4]{\frac{2100 \cdot 10^3 \cdot 943^2 \cdot 0,686^3}{231 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 2}} = 8199 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для усталеного процесу передачі тепла справедливе рівняння:

$$q = \alpha_1 \Delta t_1 = \frac{\Delta t_{\text{ст}}}{\sum \frac{\delta}{\lambda}} = \alpha_2 \Delta t_2. \quad (2.32)$$

Із рівняння (2.32) отримуємо:

$$\Delta t_{\text{ст}} = \alpha_1 \Delta t_1 \cdot \sum \frac{\delta}{\lambda}; \quad (2.33)$$

$$\Delta t_{\text{ст}} = 8199 \cdot 2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} = 5,4 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Звідки визначаємо різницю між температурою стінки з боку розчину і температурою кипіння розчину за формулою:

$$\Delta t_2 = \Delta t_{\text{пол}} - \Delta t_{\text{ст}} - \Delta t_1, \quad (2.34)$$

$$\Delta t_2 = 21 - 5,4 - 2 = 13,6 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до киплячого розчину для бульбашкового кипіння у вертикальних кип'ятильних трубках за умови природної циркуляції розчину визначаємо за формулою:

$$\alpha_2 = 780 \cdot (\alpha_1 \Delta t_1)^{0,6} \frac{\lambda^{1,3} \cdot \rho^{0,5} \cdot \rho_{\text{г.п.}}^{0,06}}{\sigma^{0,5} \cdot r_{\text{в}}^{0,6} \cdot \rho_0^{0,66} \cdot c^{0,3} \cdot \mu^{0,3}}, \quad (2.35)$$

де σ – поверхневий натяг розчину, Н/м;

$r_{\text{в}}$ – теплота пароутворення, Дж/кг.

Підставивши чисельні значення, отримуємо:

$$\alpha_2 = 780 \cdot (8199 \cdot 2)^{0,6} \cdot \frac{0,61^{1,3} \cdot 1610^{0,5} \cdot 0,42^{0,06}}{0,074^{0,5} \cdot (2100 \cdot 10^3)^{0,6} \cdot 0,579^{0,66} \cdot 3654^{0,3} \cdot (2,7 \cdot 10^{-3})^{0,3}};$$

$$\alpha_2 = 7,3 \cdot (\alpha_1 \cdot \Delta t_1)^{0,6} = 7,3 \cdot (8199 \cdot 2)^{0,6} = 1555 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Перевіримо правильність першого наближення по рівності питомих теплових навантажень:

$$q' = \alpha_1 \cdot \Delta t_1; \quad (2.36)$$

$$q' = 8199 \cdot 2 = 16398 \text{ Вт}/\text{м}^2;$$

$$q'' = \alpha_2 \Delta t_2; \quad (2.37)$$

$$q'' = 1555 \cdot 13,6 = 21148 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Як бачимо, $q' \neq q''$, тому для другого наближення прийmemo $\Delta t_1 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Нехтуючи зміною фізичних властивостей конденсату при зміні температури на $1 \text{ }^\circ\text{C}$, розрахуємо α_1 за таким співвідношенням:

$$\alpha_1 = 8199 \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{5}} = 6520 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Отримаємо:

$$\Delta t_{\text{ст}} = 6520 \cdot 5 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} = 10,75 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_2 = 21 - 10,75 - 5 = 5,25 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q' = 6520 \cdot 5 = 32600 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q'' = 2349 \cdot 5,25 = 12332 \text{ Вт/м}^2.$$

Як бачимо, знову $q' \neq q''$, тому для розрахунку в третьому наближенні будемо графічну залежність питомого теплового навантаження q від різниці температур між парою і стінкою корпусу і визначаємо Δt_1 (рис. 2.3).

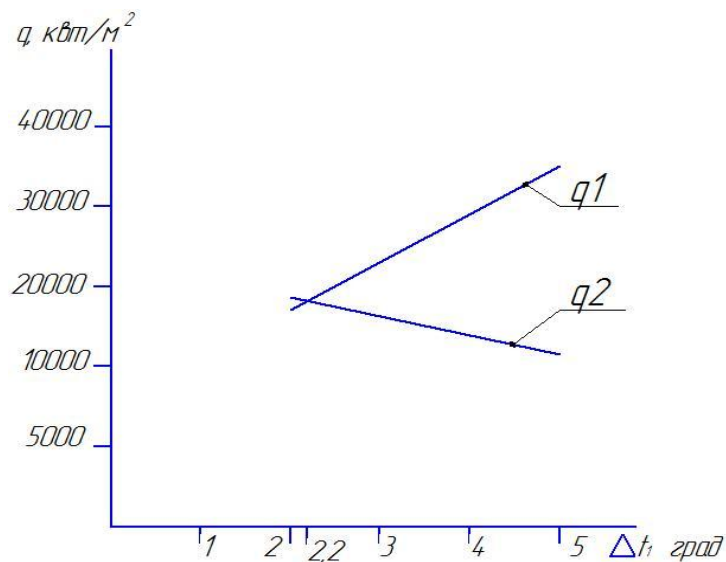


Рисунок 2.3 – Залежність питомого теплового навантаження від різниці температур

Із графічної залежності питомого теплового навантаження q від різниці температур між парою і стінкою корпусу $\Delta t_1 = 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тоді отримаємо:

$$\alpha_1 = 8199 \cdot \sqrt[4]{\frac{2}{2,2}} = 8006 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\Delta t_{\text{ст}} = 8006 \cdot 2,2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} = 5,9 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_2 = 21 - 5,9 - 2,2 = 12,9^\circ\text{C};$$

$$\alpha_2 = 7,3 \cdot (8006 \cdot 2,2)^{0,6} = 2575 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$q' = 8006 \cdot 2,2 = 17613 \text{ Вт}/\text{м}^2;$$

$$q'' = 1499 \cdot 12,9 = 193337 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Як бачимо, $q' \approx q''$. Оскільки розбіжність між тепловими навантаженнями не перевищує 3 %, розрахунок коефіцієнтів α_1 і α_2 на цьому закінчуємо.

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі за рівнянням (2.28):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8006} + 3,3 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{2575}} = 2568 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

2.5 Конструктивні розрахунки

На підставі основного рівняння теплопередачі визначаємо поверхню теплообміну грійочої камери:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{пол}}}, \quad (2.38)$$

$$F = \frac{4554 \cdot 10^3}{1497} = 177 \text{ м}^2.$$

Вибираємо випарний апарат з поверхнею теплообміну 180 м^2 .

Товщина теплової ізоляції визначається з рівності питомих теплових потоків через шар ізоляції від поверхні ізоляції в навколишнє середовище:

$$\alpha_{\text{в}} (t_{\text{ст2}} - t_{\text{в}}) = \left(\frac{\lambda_{\text{н}}}{\delta_{\text{н}}} \right) (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}), \quad (2.39)$$

де $\alpha_{\text{в}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляційного матеріалу в навколишнє середовище, Вт/(м²·К);

$t_{\text{в}}$ – температура навколишнього середовища (повітря), °С. Приймаємо рівною 20 °С;

$t_{\text{ст1}}$ – температура ізоляції з боку апарата; зважаючи на незначний термічний опір стінки апарата, у порівнянні з термічним опором шару ізоляції, приймають рівною температурі гріючої пари, °С;

$t_{\text{ст2}}$ – температура ізоляції з боку навколишнього середовища (повітря), °С;

$\lambda_{\text{н}}$ – коефіцієнт теплопровідності ізоляції, Вт/(м·К);

$\delta_{\text{н}}$ – товщина теплової ізоляції, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляційного матеріалу в навколишнє середовище визначаємо за формулою:

$$\alpha_{\text{в}} = 9,3 + 0,058 \cdot t_{\text{ст2}}. \quad (2.40)$$

Для апаратів, що працюють в закритому приміщенні значення $t_{\text{ст2}}$ вибирають в інтервалі 35–45 °С.

Приймаємо $t_{\text{ст2}} = 40$ °С. Тоді:

$$\alpha_{\text{в}} = 9,3 + 0,058 \cdot 40 = 11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

У якості матеріалу для теплової ізоляції вибираємо совеліт (85 % магnezії + 15 % азбесту), який має коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{н}} = 0,09$ Вт/(м·К).

Тоді, з рівності питомих теплових потоків через шар ізоляції від поверхні ізоляції в навколишнє середовище, визначаємо товщину теплової ізоляції за рівнянням:

$$\delta_H = \frac{\lambda_H (t_{ct1} - t_{ct2})}{\alpha_B (t_{ct2} - t_B)}; \quad (2.41)$$

$$\delta_H = \frac{0,09 \cdot (100 - 40)}{11,6 \cdot (40 - 20)} = 0,024 \text{ м.}$$

Діаметр штуцера для розведеного розчину:

$$d = \sqrt{\frac{G_H}{\rho_H \cdot 0,785 \cdot w_H}} = \sqrt{\frac{17121,6}{1610 \cdot 0,785 \cdot 1 \cdot 3600}} = 0,061 \text{ м.}$$

Діаметр штуцера для упареного розчину:

$$d = \sqrt{\frac{G_K}{\rho_K \cdot 0,785 \cdot w_K}} = \sqrt{\frac{6156}{1610 \cdot 0,785 \cdot 1 \cdot 3600}} = 0,037 \text{ м.}$$

Діаметр штуцера для введення грючої пари в корпусі:

$$d_n = \sqrt{\frac{D}{\rho_n \cdot 0,785 \cdot w_n'}}$$

де D – витрата пари, кг/с;

ρ_n – густина пари при її тиску, кг/м³ (при 0,1 МПа $\rho_n = 0,598$ кг/м³).

$$d_n = \sqrt{\frac{1,33}{0,598 \cdot 0,785 \cdot 40}} = 0,226 \text{ м}$$

2.6 Гідравлічні розрахунки

Об'ємна витрата розчину:

$$V = \frac{G_H}{\rho}; \quad (2.42)$$

$$V = \frac{5,4}{1610} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Дійсна швидкість розчину:

$$\omega = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,7^2} = 0,00075 \text{ м/с}. \quad (2.43)$$

Величина критерію Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot D \cdot \rho}{\mu}; \quad (2.44)$$

$$\text{Re} = \frac{0,00075 \cdot 0,7 \cdot 1610}{0,51 \cdot 10^{-3}} = 1657.$$

Отже, режим руху – ламінарний.

Для ламінарного режиму в круглих трубах коефіцієнт тертя визначається:

$$\lambda = \frac{75}{\text{Re}}; \quad (2.45)$$

$$\lambda = \frac{75}{1657} = 0,045.$$

Втрата тиску на тертя в прямих трубах:

$$\Delta p_{mp} = \lambda \cdot \frac{H}{D} \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot g}; \quad (2.46)$$

$$\Delta p_{mp} = 0,045 \cdot \frac{4}{0,7} \cdot \frac{0,00075}{2 \cdot 9,81} = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па.}$$

Коефіцієнти місцевих опорів:

- вхід і вихід з труби $\xi_1 = 1,0$;

- поворот на 90° $\xi_2 = 1,0$.

Втрати тиску на місцеві опори:

$$\Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2}; \quad (2.47)$$

$$\Delta p_m = (2 \cdot 1,0 + 1,0) \cdot \frac{0,00075^2 \cdot 1610}{2} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ Па.}$$

Загальна втрата тиску в трубному просторі:

$$\Delta p = \Delta p_{mp} + \Delta p_m = 9,8 \cdot 10^{-6} + 1,35 \cdot 10^{-3} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (2.48)$$

2.7 Вибір допоміжного обладнання

Для створення вакууму в випарних установках використовують конденсатори змішання з барометричною трубою. Процес включає в себе використання охолоджувального агента, яким зазвичай є вода, що подається в конденсатор і, в основному, має температуру навколишнього середовища.

Суміш охолоджуючої води і конденсату виливається з конденсатора за допомогою барометричної труби. Цей елемент важливий для підтримання сталості вакууму в системі. Для цього використовують вакуум-насос для відкачування газів, що не сконденсувалися.

Охолодження водою дозволяє конденсувати пари розчинника, які потрапляють в конденсатор, перетворюючи їх у рідкий стан. Барометрична труба відіграє роль у виведенні суміші охолодженої води і конденсату з конденсатора. Такий процес допомагає підтримувати оптимальний тиск у системі для ефективного випарювання розчинів.

Запишемо рівняння теплового балансу барометричного конденсатора:

$$G_B = \frac{W(I_{\text{б.к.}} - I_{\text{конд}})}{c_B(t_{\text{в.к.}} - t_{\text{в.н.}})} = W \frac{r + c_{\text{конд}}(t_0 - t_{\text{к.конд.}})}{c_B(t_{\text{в.к.}} - t_{\text{в.н.}})}, \quad (2.49)$$

де W – масова витрата води, що випаровується, кг/с;

$I_{\text{б.к.}}$ – ентальпія парів в барометричному конденсаторі, Дж/кг;

$I_{\text{конд}}$ – ентальпія конденсату при виході з конденсатора, Дж / кг;

$t_{\text{в.н.}}$ – початкова температура охолоджуючої води, °С;

$t_{\text{в.к.}}$ – кінцева температура суміші води і конденсату, °С;

c_B – питома теплоємність води, Дж/(кг·К);

r – теплота конденсації, Дж/кг;

$c_{\text{конд}}$ – питома теплоємність конденсату, Дж/(кг·К);

t_0 – температура конденсації, °С;

$t_{\text{к.конд.}}$ – кінцева температура конденсату, °С.

Визначаємо витрату охолоджуючої води в барометричному конденсаторі з рівняння теплового балансу конденсатора:

$$G_B = \frac{W(I_{\text{б.к.}} - c_B t_{\text{в.к.}})}{c_B(t_{\text{в.к.}} - t_{\text{в.н.}})}, \quad (2.50)$$

Різниця температур між паром і рідиною на виході з конденсатора за довідковими даними знаходиться у межах 3–5 °С.

Прийmemo температуру води на виході з конденсатора на 4 °С нижче температури конденсації пари. Тоді:

$$t_{\text{в.к.}} = t_{\text{б.к.}} - 4, \quad (2.51)$$

де $t_{\text{б.к.}}$ – температура пари в барометричному конденсаторі, °С.

$$t_{\text{в.к.}} = 56 - 4 = 52 \text{ °С.}$$

Звідки

$$G_{\text{в}} = \frac{1,71 \cdot (2632000 - 4190 \cdot 52)}{4190 \cdot (52 - 20)} = 30,8 \text{ кг/с.}$$

Діаметр барометричного конденсатора визначаємо з рівняння витрати:

$$d_{\text{б.к.}} = \sqrt{\frac{4W}{\rho \pi v_{\text{п}}}}. \quad (2.52)$$

При залишковому тиску в конденсаторі близько 104 Па, швидкість парів знаходиться в інтервалі 15–25 м/с [3]. Приймаємо швидкість парів 20 м/с. Тоді:

$$d_{\text{б.к.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,47}{0,24 \cdot 3,14 \cdot 15}} = 1,1 \text{ м.}$$

Вибираємо барометричний конденсатор діаметром $d_{\text{б.к.}} = 1200 \text{ мм.}$

Внутрішній діаметр барометричної труби становить 200 мм [3]. Знаючи внутрішній діаметр барометричної труби, визначаємо швидкість води в барометричній трубі за рівнянням:

$$v_B = \frac{4(G_B + W)}{\rho_B \pi d_{б.т.}^2}; \quad (2.53)$$

$$v_B = \frac{4 \cdot (30,8 + 1,71)}{1200 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2} = 0,86 \text{ м/с.}$$

Висота барометричної труби залежить від величини вакууму (розрідження) в конденсаторі і визначається за рівнянням:

$$H_{б.т.} = H_0 + H_{г.с.} + 0,5. \quad (2.54)$$

де H_0 – висота, на яку піднімається вода в барометричній трубі, м;

$H_{г.с.}$ – величина втраченого напору внаслідок гідравлічних опорів, м;

0,5 – запас висоти на можливу зміну барометричного тиску, м.

Висота, на яку піднімається вода в барометричній трубі визначається за формулою:

$$H_0 = \frac{B}{\rho_B g}, \quad (2.55)$$

де B – вакуум в барометричному конденсаторі, Па;

g – прискорення вільного падіння, м²/с;

ρ_B – густина води, кг/м³.

Величина втраченого напору внаслідок гідравлічних опорів розраховується за рівнянням:

$$H_{г.с.} = \left(1 + \sum \xi + \lambda \frac{H_{б.т.}}{d_{б.т.}} \right) \frac{v_B^2}{2g}, \quad (2.56)$$

де $\sum \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів;

λ – коефіцієнт тертя в барометричній трубці;

$H_{б.т.}$ – висота барометричної труби, м;

$d_{б.т.}$ – внутрішній діаметр барометричної труби, м;

v_B – швидкість води в барометричній трубці, м/с;

g – прискорення вільного падіння, м²/с.

Тоді висоту барометричної труби визначимо за рівнянням:

$$H_{б.т.} = \frac{B}{\rho_B g} + \left(1 + \sum \xi + \lambda \frac{H_{б.т.}}{d_{б.т.}} \right) \frac{v_B^2}{2g} + 0,5. \quad (2.57)$$

Вакуум в барометричному конденсаторі визначаємо за рівнянням:

$$B = P_{атм} - P_0, \quad (2.58)$$

де $P_{атм}$ – атмосферний тиск, Па;

P_0 – тиск в барометричному конденсаторі, Па.

$$B = 9,8 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^4 = 8,7 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\sum \xi = \xi_{вх} + \xi_{вих}, \quad (2.59)$$

де $\xi_{вх}$, $\xi_{вих}$ – коефіцієнти місцевих опорів на вході в трубу і на виході з неї, рівні відповідно 0,5 і 1,0.

$$\sum \xi = 0,5 + 1,0 = 1,5.$$

Коефіцієнт тертя залежить від режиму течії рідини в барометричній трубі. Визначимо режим течії води в барометричній трубі за рівнянням:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{в}} \cdot d_{\text{б.т.}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}; \quad (2.60)$$

$$\text{Re} = \frac{0,86 \cdot 1,2 \cdot 1000}{0,54 \cdot 10^{-3}} = 191111.$$

За довідковими даними [4] для гладких труб при $\text{Re} = 191111$ коефіцієнт тертя дорівнює $\lambda = 0,024$.

Підставивши в рівняння (1.57) зазначені значення, отримаємо:

$$H_{\text{б.т.}} = \frac{1,91 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,8} + \left(1 + 1,5 + 0,024 \cdot \frac{H_{\text{б.т.}}}{0,2} \right) \cdot \frac{1,04^2}{2 \cdot 9,8} + 0,5.$$

Звідки $H_{\text{б.т.}} = 8,4$ м.

Для забезпечення безперебійної подачі вихідного розчину в підігрівач і нормальної роботи установки протягом двох годин обирається ємність, яка придатна для експлуатації при тиску понад 0,01 МПа і має робочий об'єм не більше 20,9 м³. У даному випадку обрано тип ємності ГКК1-1-25-0,07.

Для упареного (концентрованого) розчину вибираються ємності, що здатні витримувати вакуум. Таким чином, обираються дві ємності, які працюють при тиску не більше 0,01 МПа і мають той самий об'єм, що і для вихідного розчину, а саме ГКК1-1-25-0,07.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вибір конструкційних матеріалів [16, 17]

Конструкційні матеріали для випарних апаратів часто вибираються з вуглецевих кислотостійких сталей. Це важливо через роботу важких умов, де висока температура та висококонцентровані розчини сприяють активним процесам корозії. У таких умовах може відбуватися і механічне зношування металу в трубках, особливо в областях інтенсивного кипіння, де може виникати ерозія.

Вуглецеві кислотостійкі сталі відзначаються високою стійкістю до впливу корозійних факторів і можуть витримувати екстремальні умови експлуатації в процесах випарювання. Вибір матеріалу залежить від конкретних умов роботи, типу розчину і температурних параметрів процесу.

Основні критерії вибору матеріалу:

1. Термічна стійкість. Матеріал повинен витримувати температурні умови процесу без деформації або зміни механічних властивостей.
2. Міцність і тривкість. Матеріал повинен мати необхідні механічні властивості для витримання тиску, навантажень і можливих деформацій.
3. Корозійна стійкість. У випадку взаємодії з агресивним середовищем, матеріал повинен бути стійким до корозії та інших хімічних впливів.
4. Вартість. Матеріал повинен бути економічно доцільним для виробництва.
5. Технологічність виготовлення. Вибраний матеріал має бути легко оброблюваним і піддається технологічним операціям виготовлення.
6. Доступність. Матеріал повинен бути легко доступним на ринку.

Врахування цих факторів допомагає забезпечити ефективну роботу елемента або апарата протягом тривалого часу і знизити витрати на виготовлення та експлуатацію.

За рекомендацією [16], для виготовлення деталей, які стикаються з робочим середовищем, рекомендується використовувати корозійностійку сталь 12Х18Н10Т. Цей матеріал відомий своєю високою стійкістю до корозії та хімічної стійкістю, що робить його ідеальним для умов, де матеріал може зазнавати впливу агресивних речовин або високих температур.

Для виготовлення опор і інших деталей, які не мають прямого контакту з робочим середовищем, застосовується сталь Ст.3сп. Це може бути обумовлено економічнішою вартістю цього матеріалу або його властивостями, які достатньо відповідають умовам експлуатації, але не вимагають такого високого рівня стійкості до корозії.

У якості прокладкового матеріалу використовується пароніт ПОН-Б. Це може бути пов'язане із властивостями пароніту, який добре підходить для утворення герметичних ущільнень та прокладок. Вибір такого матеріалу може бути зумовлений його хімічною стійкістю і здатністю утримувати форму при стисканні.

3.2 Розрахунки апарата на міцність, стійкість та герметичність [17]

Прийmemo коефіцієнт міцності зварних швів $\varphi = 0,9$ (ручне дугове електрозварювання), напруження для матеріалу корпусу при $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$ [17]:

$$\sigma = 170 \text{ МПа.}$$

Для листового матеріалу допустиме напруження складе:

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma = 1 \cdot 170 = 170 \text{ МПа.} \quad (3.1)$$

Розрахункова товщина стінки кожуха:

$$s_p = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p}, \quad (3.2)$$

де p – тиск пари в міжтрубному просторі; $p = 0,1$ МПа.

$$s_p = \frac{0,1 \cdot 1200}{2 \cdot 0,9 \cdot 170 - 0,1} = 1,05 \text{ мм}. \quad (3.3)$$

Пробний тиск при гідравлічних випробуваннях:

$$p_n = 1,25 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_n}{[\sigma]}, \quad (3.4)$$

де $[\sigma]_n$ – пробне допустиме напруження, МПа.

$$[\sigma]_n = \frac{\sigma_m}{1,1} = \frac{184}{1,1} = 167,3 \text{ МПа}. \quad (3.5)$$

Тоді

$$p_n = 1,25 \cdot 0,1 \cdot \frac{167,3}{170} = 0,492 \text{ МПа}.$$

Із урахуванням гідростатичного тиску отримаємо:

$$p_r = H \cdot \rho \cdot g, \quad (3.6)$$

де H – висота кип'ятільних труб, м.

$$p_e = 4 \cdot 1610 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} = 0,047 \text{ МПа}; \quad (3.7)$$

$$p = p_n + p_e = 0,492 + 0,047 = 0,539 \text{ МПа.} \quad (3.8)$$

У цьому випадку розрахункова товщина стінки кожуха:

$$s_p = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_n - p} \quad (3.9)$$

$$s_p = \frac{0,539 \cdot 1200}{2 \cdot 0,9 \cdot 167,3 - 0,539} = 2,87 \text{ мм.}$$

Надбавка до розрахункової товщини за весь термін служби апарата (10 років):

$$c = 0,1 \cdot 10 = 1,0 \text{ мм.}$$

Тоді

$$s = s_p + c = 2,87 + 1 = 3,87 \text{ мм.} \quad (3.10)$$

Мінімальна товщина обичайки для апаратів 1200 мм становить 10 мм. На цій товщині і зупиняємо свій вибір. Тоді для грючої камери, провівши розрахунок аналогічно сепаратора, отримаємо $s = 10$ мм.

Розрахункова товщина стінки кришки при проведенні гідравлічних випробувань:

$$s_p = \frac{p_n \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_n - 0,5 \cdot p_n}; \quad (3.11)$$

$$s_p = \frac{0,539 \cdot 600}{2 \cdot 0,9 \cdot 167,3 - 0,5 \cdot 0,539} = 1,44 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина стінки кришки:

$$s_{кр} = s_p + c = 1,44 + 1,0 = 2,44 \text{ мм.} \quad (3.12)$$

З метою уніфікації сортаменту матеріалу приймаємо $s_{кр} = 6,0$ мм.

Для кришки сепаратора:

$$s_p = \frac{0,539 \cdot 1200}{2 \cdot 0,9 \cdot 167,3 - 0,5 \cdot 0,539} = 2,87 \text{ мм;} \quad (3.13)$$

$$s_{кр} = s_p + c = 2,87 + 1,0 = 3,87 \text{ мм.} \quad (3.14)$$

З метою уніфікації сортаменту матеріалу приймаємо $s_{кр} = 8,0$ мм.

Маса обичайки кожуха дорівнює:

$$m_k = \left[\frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot s)^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot l \cdot \rho, \quad (3.15)$$

де $\rho = 7860 \text{ кг/м}^3$ – щільність сталі.

$$m_k = \left[\frac{3,14 \cdot (0,6 + 2 \cdot 0,006)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} \right] \cdot 4 \cdot 7860 = 359 \text{ кг.}$$

Маса кришки і днища:

$$m_{кр} = 1,24 \cdot D^2 \cdot s_{кр} \cdot \rho; \quad (3.16)$$

$$m_{кр} = 1,24 \cdot 0,6^2 \cdot 0,006 \cdot 7860 = 37 \text{ кг.}$$

Маса труб:

$$m_{\text{тр}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot l \cdot n \cdot \rho; \quad (3.17)$$

$$m_{\text{мп}} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,038^2 - 0,034^2) \cdot 4 \cdot 211 \cdot 7860 = 1500 \text{ кг.}$$

Маса фланця з решіткою:

$$m_{\phi} = \frac{\pi \cdot D_{\phi}^2}{4} \cdot h_{\phi} \cdot \rho, \quad (3.18)$$

де D_{ϕ} – зовнішній діаметр фланця, м;

h_{ϕ} – висота фланця, м.

$$m_{\phi} = \frac{3,14 \cdot 0,72^2}{4} \cdot 10 \cdot 7860 = 418 \text{ кг.}$$

Об'єм трубного простору:

$$V_{\text{тр}} = 0,785 \cdot d^2 \cdot n \cdot l; \quad (3.19)$$

$$V_{\text{мп}} = 0,785 \cdot 0,034^2 \cdot 211 \cdot 4 = 0,766 \text{ м}^3.$$

При коефіцієнті паронаповнення $\varepsilon = 0,5$ маса розчину дорівнює:

$$m_p = V_{\text{мп}} \cdot \rho \cdot \varepsilon; \quad (3.20)$$

$$m_p = 0,766 \cdot 1610 \cdot 0,5 = 616,6 \text{ кг.}$$

Сила тяжіння апарата у робочому стані:

$$G = g \cdot (m_k + 2 \cdot m_{kp} + m_{tp} + 2 \cdot m_{\phi} + m_p); \quad (3.21)$$

$$G = 9,81 \cdot (359 + 2 \cdot 37 + 1500 + 2 \cdot 418 + 676,6) = 33213 \text{ Н} = 33,21 \text{ кН.}$$

Приймаємо кількість опор $n = 4$ шт. Навантаження на одну опору складе:

$$Q = \frac{G}{n} = \frac{33,21}{4} = 8,31 \text{ кН.} \quad (3.22)$$

Вибираємо 4 опори з допустимим навантаженням $Q = 10$ кН.

4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

4.1 Обґрунтування компоновання основного та допоміжного обладнання [18]

Проектування хімічних виробництв – це творчий і складний процес, який включає в себе багато етапів та вимагає високої кваліфікації інженерів та науковців. Цей процес спрямований на пошук оптимальних інженерно-технічних рішень в умовах невизначеності та обмежених ресурсів. Компоновання обладнання є однією з ключових стадій у проектуванні підприємств хімічної промисловості. Це завдання вимагає не тільки глибоких знань з області хімічного інженерінгу, але й уміння раціонально розміщувати технічні засоби для досягнення оптимальних економічних і екологічних показників.

Для поліпшення якості та скорочення термінів проектування важливо використовувати сучасні обчислювальні техніки. Використання комп'ютерних програм і технологій дозволяє швидше та ефективніше проводити розрахунки, моделювання та аналіз різних аспектів проектів.

При плануванні розміщення обладнання необхідно враховувати кілька технологічних вимог для забезпечення ефективності та зручності експлуатації:

1. Зручність обслуговування обладнання. Розташування обладнання повинно забезпечувати легкий доступ для проведення регулярного обслуговування та технічного обслуговування. Простий доступ до контрольних пунктів, інструментів та устаткування для обслуговування та ремонту.
2. Можливість демонтажу обладнання або частин при ремонті. Розташування повинно передбачати можливість вилучення окремих частин або обладнання для ремонту без впливу на решту системи. Забезпечення простого демонтажу для заміни або модернізації обладнання.
3. Максимально короткі трубопроводи між аппаратами. Мінімізація довжини трубопроводів допомагає зменшити втрати тиску та забезпечити ефективну роботу системи. Краще розташовувати обладнання так, щоб трубопроводи були якнайкоротшими та прямими.

Ці технологічні вимоги сприяють оптимізації експлуатаційних процесів та полегшують обслуговування, а також забезпечують гнучкість у випадках потреби у ремонті чи модифікації обладнання.

Обладнання може бути розміщене у трьох основних варіантах

Закритий варіант (у приміщенні). Обладнання розташоване всередині спеціальних будівель чи приміщень, що забезпечують йому захист від атмосферних впливів та контрольовані умови середовища. Забезпечує додатковий захист від погодних умов та підвищує безпеку обладнання.

Відкритий варіант. Обладнання розташоване на відкритих майданчиках без додаткового закритого захисту. Застосовується, коли обладнання відповідає вимогам стійкості до зовнішніх впливів та погодних умов.

Змішаний варіант (частково у приміщенні, частково на відкритому майданчику). Обладнання розміщене як у закритих приміщеннях, так і на відкритому повітрі, залежно від його характеристик та вимог до умов експлуатації. Забезпечує комбінацію захисту та ефективного використання зовнішнього простору.

Вибір місця розташування обладнання залежить від його функціональних характеристик, вимог до умов експлуатації, безпекових норм, а також економічних та технічних обставин. Вибір закритого варіанта установки обладнання в будівлі для даного виробництва є більш доцільним, адже:

- закрита будівля надає обладнанню додатковий захист від погодних умов, осадження опадів, впливів вітру і температурних коливань;
- можливість створення та підтримання специфічних умов середовища всередині будівлі, що може бути критичним для ефективності та надійності обладнання;
- забезпечення безпеки персоналу та забезпечення легкого доступу для обслуговування та ремонту обладнання через закритий простір;
- забезпечення можливості встановлення систем контролю та автоматизації, що поліпшує ефективність та надійність виробництва.

Компонування будівлі з використанням однотипних секцій та їх розташуванням прольотами в одному напрямку є стратегічним і дозволяє досягти кількох важливих цілей. Стандартизовані секції дозволяють оптимально розміщувати обладнання та приміщення, максимально використовуючи корисну площу будівлі. Однотипні секції можуть бути виготовлені заводським шляхом, що спрощує будівництво та зменшує витрати часу і ресурсів.

Застосування стандартизованих конструкцій дозволяє знизити витрати на матеріали та прискорити час будівництва. Функціональна необхідність будівлі визначає розміщення різних секцій та їх характеристик, таким чином, щоб задовольняти вимоги виробництва.

4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [19, 20]

Випарний апарат з природною циркуляцією, який включає гріючу камеру і сепаратор, є важливою частиною хімічного обладнання. Цей тип теплообмінного обладнання використовується для випарювання рідини і відокремлення вторинної пари від рідини.

Монтаж випарного апарату – це важливий етап введення обладнання в експлуатацію, який вимагає точного дотримання інженерних та технічних стандартів. У якості підготовчих робіт здійснюють чистку та підготовку робочого місця. Також треба забезпечити відповідну вентиляцію та безпеку на місці монтажу. Далі розпаковують складові частини апарату та здійснюють їхній транспортний контроль. Перевіряють наявність усіх необхідних документів, інструкцій та деталей.

Монтаж випарного апарату:

- встановлення гріючої камери і сепаратора відповідно до конструктивних схем та проектних документів;
- підключення трубопроводів, включаючи підводку теплоносія та вивід конденсату;

- підключення всіх електричних елементів, які включають в себе датчики, регулятори, нагрівальні елементи і т. д.;
- проведення гідравлічних випробувань для перевірки герметичності трубопроводів та компонентів;
- регулювання та налагодження системи циркуляції;
- встановлення теплоізоляції на трубопроводах та деталях апарату для забезпечення теплозахисту та ефективності процесу;
- проведення поетапного запуску обладнання та контроль за його роботою;
- налагодження параметрів роботи відповідно до вимог технологічного процесу;
- складання технічної документації, включаючи паспорт, інструкції з експлуатації та технічний паспорт;
- передача готового випарного апарату замовнику для подальшої експлуатації.

Розглядаючи ремонт, можна виділити дві основні частини апарату: гріючу камеру і сепаратор.

Гріюча камера:

Очищення від накипу. Завдяки впливу високих температур, гріюча камера піддається утворенню накипу на своїх поверхнях. Регулярне очищення від накипу дозволяє підтримувати ефективність теплообміну.

Ремонт трубного пучка. Трубний пучок гріючої камери може покриватися осадами солей або інших забруднень, що обмежують теплопередачу. Ремонт включає в себе видалення забруднень та несправностей в трубах.

Заміна ущільнювальних елементів. Ущільнювальні елементи, такі як ущільнювальні кільця, можуть зноситися від впливу високих температур і агресивних середовищ. Заміна цих елементів важлива для запобігання витoku рідини чи пари.

Сепаратор:

Очищення та відновлення ефективності. Сепаратор відокремлює вторинну пару від рідини, але може стикатися з утворенням накипу чи забрудненням. Регу-

лярне очищення і відновлення ефективності сепаратора є ключовим етапом обслуговування.

Заміна елементів сепарації. Деякі елементи сепаратора можуть вимагати заміни через знос або дефект. Забезпечення правильної роботи сепаратора включає в себе регулярну перевірку та, за необхідності, заміну цих елементів.

Зношення випарного апарата проявляється в ряді ознак і дефектів, які можуть впливати на його ефективність та надійність.

Корпус, днище, трубні решітки – зношення може викликати тоншення матеріалів через корозію або механічний знос, що може підірвати міцність та стійкість апарата.

Може виникнути випучення або вм'ятини внаслідок механічних напруг або зовнішніх впливів, що можуть впливати на герметичність та міцність апарата. Поява тріщин, свищів або прогарів може бути результатом механічних напруг, термічного впливу або корозії, що загрожує стійкості та надійності апарата.

Зношення може викликати збільшення діаметра отворів у трубних решітках, що може призвести до зменшення ефективності випарювання. З деформацією трубних решіток пов'язане зношення, що може виникати через механічні чинники або вплив високих температур.

Зазначені ознаки вказують на необхідність технічного обслуговування та ремонту випарного апарата для підтримання його оптимальної працездатності та безпеки.

Очищення трубок теплообмінників може виконуватися різними методами в залежності від типу відкладень та конкретних умов експлуатації.

Хімічний метод. Використання хімічних розчинів або реагентів для розчинення відкладень. Застосовується для розчинних відкладень, таких як накип або водорості. Метод може вимагати часу для ефективної реакції.

Абразивний метод. Використання абразивних матеріалів або частинок для механічного видалення відкладень. Ефективний проти твердих, нерозчинних

відкладень, таких як вапняк чи іржа. Має потенційні ризики механічного зносу матеріалу трубок.

Спеціальний метод. Використання спеціальних пристроїв, таких як ультразвукові чи гідродинамічні системи. Ультразвукові системи можуть допомагати розбити та видалити відкладення. Гідродинамічні системи використовують водяний струм для механічного видалення забруднень.

Механічний метод. Використання спеціальних щіток, скребків чи інших механічних засобів для чищення трубок. Ефективний проти різноманітних відкладень, включаючи масло чи сажу. Вимагає доступу до трубок для введення механічних засобів.

Вибір методу очищення залежить від типу відкладень, особливостей конкретного теплообмінного обладнання та можливостей проведення робіт. Важливо враховувати потенційні ризики для матеріалу трубок та ефективність очищення при виборі конкретного методу.

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [21, 22]

Під час проведення процесу випарювання важливо контролювати ряд параметрів для забезпечення ефективності, безпеки та стабільності процесу. Розглянемо основні контрольовані параметри у випарних системах:

1. Температура гріючого елемента.

Контроль температури нагрівального елемента або гріючої камери є одним із ключових аспектів управління процесом випарювання. Вірна температура гарантує ефективність та стабільність випарювального процесу. Важливо встановити оптимальний режим температури в гріючій камері, який забезпечить ефективне випарювання розчину без перегрівання чи недогрівання. Постійний моніторинг температури дозволяє вчасно виявляти будь-які зміни чи відхилення від установлених значень. Використання автоматизованих систем управління, які можуть автоматично регулювати температуру з урахуванням змінних умов або об'єму оброблюваного розчину.

2. Температура розчину.

Контроль температури вихідного розчину, який нагрівається в гріючій камері, є важливим елементом процесу випарювання. Температура вихідного розчину впливає на ефективність випарювання, концентрацію отриманого продукту та інші параметри процесу. Встановлення оптимального режиму температури, який забезпечить високу ефективність випарювання без руйнування чи деградації розчину. Забезпечення стабільності температури вихідного розчину для уникнення відхилень, які можуть вплинути на якість та консистенцію продукту.

3. Тиск в апараті.

Забезпечення безпеки обладнання та персоналу шляхом уникнення перевищення допустимих рівнів тиску, що може призвести до аварій. Встановлення оп-

тимальних параметрів тиску для забезпечення найвищої ефективності випарювання при безпеці. Використання автоматизованих систем контролю для динамічного регулювання тиску в залежності від умов процесу.

Контроль тиску при надходженні розчину в апарат для уникнення різких тискових ударів, які можуть виникнути при великому тиску. Застосування систем, що запобігають перевищенню тиску під час процесу випарювання, зокрема в умовах змінної інтенсивності випарювання.

4. Рівень рідини.

Контроль рівня рідини в апараті для запобігання ситуаціям переливання чи недостатнього рівня рідини.

5. Швидкість циркуляції.

Контроль за швидкістю циркуляції рідини або пари в апаратах з виносною гріючою камерою є ключовим аспектом у забезпеченні ефективності та безпеки процесу. Контроль за швидкістю циркуляції дозволяє підтримувати оптимальний рівень теплообміну в гріючій камері, що важливо для ефективного випарювання.

Регулювання швидкості циркуляції допомагає уникнути можливих затримок в русі рідини або пари, що може виникнути через різні фактори, такі як забруднення, витрата енергії тощо. Швидкість циркуляції може впливати на температурний режим в системі. Збалансоване регулювання дозволяє уникнути перегріву чи недогріву рідини або пари.

Також контроль за швидкістю циркуляції допомагає уникнути кавітації, яка може призвести до ушкодження обладнання та зниження ефективності.

5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [22, 23]

Відділення вакуум-випарювання призначене для узгодженого підвищення концентрації TiO_2 у розчинах титанілсульфату. Цей процес направлений на отримання високоякісного діоксиду титану за рахунок видалення води з розчину під

вакуумним тиском. Розчин титанілсульфату, який має температуру 18–20°C, подається зі збірника насосом і, пройшовши підігрівач, направляється в трубний простір кип'ятильника. У міжтрубний простір кип'ятильника подається пар під тиском від 5,5 до 6 кгс/см². Температура розчину титанілсульфату, що подається в трубний простір кип'ятильника, підвищується до значення, що не перевищує 60°C. При вакуумному тиску від 0,97 до 0,93 кгс/см² відбувається закипання цього розчину.

Це відділення визначено для забезпечення оптимального керування концентрацією TiO₂ та температурою розчину в процесі випарювання, забезпечуючи ефективність та якість отриманого діоксиду титану. Піддавання розчину вакуумному випарюванню призводить до його концентрування та відокремлення від води, що дозволяє досягти високих показників якості та чистоти продукту.

При виборі та встановленні приладів для контролю та регулювання важливо керуватися рядом ключових принципів:

- обирайте прилади, які забезпечують високу точність вимірювань та є надійними в роботі;
- визначайтеся з моделями, які відзначаються стійкістю до впливу зовнішніх факторів;
- вибирайте прилади з чіткою та наочною шкалою, а також покажчиком, що легко сприймається оператором;
- забезпечуйте зручність спостереження та інтерпретації вимірювань;
- розташовуйте місцеві прилади так, щоб вони були легко доступні для спостереження та обслуговування;
- забезпечуйте можливість швидкого та зручного доступу для проведення ремонтних робіт;
- враховуйте стійкість приладів до змін зовнішніх умов, таких як температурні коливання та зміни тиску навколишнього середовища;

- обирайте термометри та термопари, які обладнані міцними захисними трубками, призначеними для ефективного захисту від агресивних умов роботи;
- віддавайте перевагу дифманометрам із діафрагмами, обладнаними камерами та фланцями, розрахованими на ефективну експлуатацію в конкретних умовах;
- переконайтеся, що вимірювальні та регулюючі прилади відповідають всім вимогам щодо безпеки, зокрема вимогам щодо запобігання вибухів та пожеж.

При виборі конкретних типів автоматичних пристроїв для системи управління важливо враховувати особливості конкретного об'єкта управління і прийнятої системи (місцеве чи централізоване управління). Якщо об'єкт управління вважається пожежо- або вибухонебезпечним, обирають пристрої, що відповідають вимогам стандартів безпеки. Аналізують агресивність та токсичність середовища для вибору пристроїв, які здатні працювати в таких умовах.

Якщо система управління має велику кількість параметрів, вибирають пристрої, які забезпечують ефективний контроль. Розглядають хімічні властивості параметрів управління при виборі сумісних пристроїв. Обирають пристрої, що задовольняють вимоги до точності та надійності контролю і регулювання.

Вибір автоматизаційних приладів слід здійснювати з урахуванням доступності та надійності. Застосування вже перевірених та серійно вироблених засобів автоматизації має переваги, оскільки це гарантує їхню ефективність та сумісність із стандартами. Якщо можливо, слід віддавати перевагу приладам, виробленим на території України, сприяючи таким чином розвитку внутрішнього виробництва.

При виборі приладів для автоматизації слід враховувати необхідний діапазон вимірювань, оскільки це забезпечить точність та надійність процесу контролю та регулювання. З урахуванням пожежонебезпеки у спиртовому

виробництві, раціональним рішенням є використання пневматичних приладів, які не мають електричних компонентів і менше вразливі до впливу потенційно небезпечних умов.

Обрані прилади повинні відповідати вимогам безпеки та ефективно функціонувати в конкретних умовах виробництва.

Сімейство вимірювальних перетворювачів температури фірми SIEMENS представлено перетворювачами SITRANS T, термоперетворювачами опору і термомпарами для якісного вимірювання температури в будь-яких, навіть самих екстремальних, умовах. Датчики застосовуються в хімічній, фармацевтичній, харчовій, енергетичній та інших галузях промисловості.

Існують варіанти термометрів з цифровою індикацією показань. Також доступні вибухозахищене виконання датчиків.

Перетворювач SITRANS T серії: TW – універсальний перетворювач з виходом 4–20 мА + HART, програмований за допомогою РС.

Сімейство витратомірів SITRANS F здатне вирішити задачу точного і надійного вимірювання витрати практично будь-якого середовища, використовуючи сучасні, перевірені часом, способи вимірювання витрати. Перетворювач SITRANS F серії M Magflo – магнітоіндукційні витратоміри. Застосовуються для вимірювання витрати електропровідних рідин і суспензій.

Гама рівнемірів SIEMENS для контролю рівня рідких і сипких середовищ втілена в сімействі SITRANS L і дозволяє знайти рішення для широкого спектра задач. Сигналізатор граничного рівня (ємнісний) Pointek CLS 200 – універсальний сигналізатор із високою хімічною стійкістю.

Сімейство вимірювальних перетворювачів SITRANS P служить для вимірювання надлишкового, вакууметричного, абсолютного і диференціального тиску рідких, газо- і пароподібних середовищ, а також для вимірювання гідростатичного рівня рідини в ємностях. Перетворювач SITRANS P серії ZD – перетворювач надлишкового та абсолютного тиску з цифровим індикатором.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів [24]

Двоокис титану пігментний, відомий також як діоксид титану, представляє собою штучний неорганічний білий пігмент, який може існувати у формах анатазу та рутилу. Його отримують шляхом гідролізу розчинів сірчаноокислого титану з наступним прожарюванням гідратованого двоокису титану. Двоокис титану пігментний визначається як пожежонебезпечний та вибухонебезпечний матеріал, а його вплив на організм класифікується як речовина 4-го класу безпеки.

Чистий діоксид титану представляє собою безбарвну тверду кристалічну речовину, і навіть при відсутності власного кольору великих кількостей, він виявляє надзвичайну ефективність як білий пігмент, якщо він належним чином очищений. У видимій області спектру TiO_2 практично не поглинає падаюче світло, і світло може лише проходити через нього, переломлюватися або відбиватися від його поверхні.

Титановий діоксид є стабільним (найстабільніший серед усіх відомих білих пігментів), неликтогенним та нерозчинним в кислотах, лугах і розчинах за нормальних умов. Його висока реакційна стійкість до різних сполук, включаючи токсичні речовини в повітрі, свідчить про його надійність як матеріалу. Більше того, через свою інертність, діоксид титану є безпечним для здоров'я і може контактувати з продуктами в упаковці. Також, при відповідних концентраціях, його можна використовувати як безпечний харчовий барвник.

Діоксид титану виявляється поліморфним і може існувати у трьох основних кристалічних формах, а саме: анатаз, рутил і брукіт. З цих форм, брукіт має рідше виявлення в природі і не викликає комерційного інтересу, навіть як об'єкт лабораторних досліджень.

Рутиль є однією з основних кристалічних форм діоксиду титану і відрізняється тим, що він розсіює світло набагато ефективніше, приблизно на

30 %, порівняно з анатазом, який є іншою формою. Крім того, рутиль проявляє більшу атмосферостійкість, що робить його перевагою у певних застосуваннях. Анатаз, навпаки, менш стійкий до впливу атмосферних умов і може викликати фотокаталітичні процеси, а також спричиняти деградацію та втрату властивостей полімерних матеріалів, зокрема у вигляді захисту від УФ-променів у полімерних матеріалах, таких як акрилати та пластмаси.

Розсіююча здатність пігменту визначає його ефективність у відбитті світла видимого спектра при певних довжинах хвиль. В контексті діоксиду титану цей показник прямо пов'язаний з розміром частинок TiO_2 . Коли розмір частинок складає 0,2 мікрметра, сумарне розсіювання світла для всіх довжин хвиль досягає максимального рівня. Збільшуючи розмір частинок від 0,25 до 0,3 мікрметра, спостерігається швидке зниження розсіювання блакитного світла, однак розсіювання зеленого і червоного практично залишається незмінним. У випадку діаметру частинок 0,15 мікрметра спостерігається максимальне розсіювання синього світла, тоді як розсіювання червоного і зеленого зазнає помітного зниження.

Маслоємність пігменту визначається його здатністю утримувати на своїй поверхні певну кількість масла і виражається в грамах на 100 грам пігменту, зазвичай коливаючись від 10 до 20. Цей показник визначає ефективність пігменту в розчинах та композиціях.

Покриваність пігменту обумовлюється його здатністю рівномірно розподілятися в обсязі та зробити невидимим колір вихідного матеріалу. Цей показник вимірюється в грамах пігменту, необхідного для розфарбування поверхні площею 1 м^2 . Білі пігменти, такі як діоксид титану, досягають покриваності шляхом ефективного розсіювання світла всього видимого спектру.

Колір визначається зоровим відчуттям, викликаним випромінюванням тіл у відповідності зі спектральним складом і інтенсивністю відбитого світла. Діоксид титану характеризується високою яскравістю, білизною та відмінною

відбиваючою здатністю, що призводить до його використання як ефективного білого пігменту.

Світлостійкість вказує на здатність матеріалу зберігати свій колір під впливом світлових променів. Це особливо важливо для виробів, що знаходяться під впливом природного та штучного світла, оскільки деякі матеріали можуть піддаватися змінам кольору під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Атмосферостійкість полягає в здатності полімерних композицій витримувати негативний вплив сонячних променів, атмосферних опадів, морозу, снігу, вітру та інших атмосферних умов. Ця властивість є ключовою для забезпечення тривалої експлуатації виробів, що зазнають впливу зовнішніх атмосферних факторів.

Двоокис титану пігментний пакується в різноманітні упаковки для забезпечення його зберігання та транспортування. Серед використовуваних типів упаковок є сталеві фляги, сталеві, картонно-навивні, фанерні барабани, а також дерев'яні барабани, які можуть мати поліетиленовий вкладиш. Також використовуються поліетиленові, паперові та бочки з прогумованої тканини.

Упакований пігментний двоокис титану транспортується різними видами транспорту в кришених транспортних засобах. Дозволяється перевозити продукцію, яка упакована в м'які спеціалізовані контейнери, у відкритих транспортних засобах. Зберігають пігментний двоокис титану в закритих складських приміщеннях при температурі навколишнього середовища від мінус 40 до плюс 400°C. Допускається також зберігання продукції, яка упакована в м'які спеціалізовані контейнери, на відкритих майданчиках. Упаковану продукцію розміщують в стопках висотою не більше 3 метрів на підкладки або дерев'яні піддони.

Основні вимоги безпеки при роботі з TiO_2 представлено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Основні властивості TiO_2 та види небезпеки

Клас небезпеки	4
Основні властивості	Залишається термічно і хімічно стійким, не змінює колір при нагріванні, і водночас не взаємодіє з водою, розведеними кислотами і лугами. Його стійкість до реакцій з гідратом аміаку також є важливою характеристикою. Однак слід відзначити, що цей білий порошок може повільно розчинятися в концентрованій сірчаній кислоті, що може свідчити про його хімічну реактивність у відношенні до даного середовища.
Вибухо- і пожежонебезпека	Цей білий порошок має важливі властивості, які пов'язані з безпекою. Зокрема, він вважається пожежонебезпечним та вибухонебезпечним матеріалом. Однак, слід відзначити, що він не піддається термодеструкції, що може бути важливою характеристикою для забезпечення стабільності та безпеки його використання та зберігання.
Небезпека для людини	Не має вираженої клінічної картини гострого отруєння, і відноситься до речовин, які переважно мають фіброгенну дію. Отруєння може виникнути через різні шляхи надходження, такі як вдихання аерозолі, випадкове ковтання або попадання на шкіру та в очі. Важливо відзначити, що цей матеріал, як правило, не викликає виражених симптомів подразнення шкірних покривів і слизових оболонок очей, хоча може мати дратівливий ефект на верхні дихальні шляхи.

Засоби індивідуального захисту	Для забезпечення безпеки працівників рекомендується використовувати спецодяг у вигляді суконного костюма, спецвзуття у вигляді ризинових чобіт, а також захисні засоби, такі як респіратор ШБ-1 "Лепесток" та захисні окуляри. Важливо також використовувати засоби захисту рук для мінімізації контакту з продуктом. Ці заходи допомагають забезпечити безпеку працівників під час взаємодії з вказаним матеріалом.
--------------------------------	--

6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора

1. Відповідно до Правил устрою електроустановок (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТБ) і Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ), опір, що допускає розтікання струму в заземленому обладнанні, залежить від параметрів мережі. Для мережі до 1000 В з ізольованою і глухо заземленою нейтраллю, допустимий опір заземлення R_z зазвичай визначається згідно з ПТБ і може бути встановлений на рівні 4 Ом.

2. Визначається питомий опір ґрунту, який рекомендований для розрахунків, $\rho_{\text{табл}}=40$ Ом·м.

Питомий опір ґрунту (або питома опірність) – це величина, яка характеризує електричну провідність ґрунту. Вимірюється в омах на одиницю довжини або в омах на квадратний метр (Ом/м або Ом·м). Для розрахунків приймаємо значення $\rho_{\text{табл}}=40$ Ом·м. Це значення може використовуватися при проектуванні електроустановок для розрахунку опору ґрунту в системах заземлення, зокрема для визначення опору при глибинному заземленні. При цьому слід також враховувати спе-

цифічні властивості ґрунту на конкретному місці, такі як вологість, склад, температура і інші.

3. Визначення питомого опору ґрунту для стрижнів і смугового заземлювача зазвичай враховує несприятливі умови і використовується коефіцієнт для корекції. Підвищувальні коефіцієнти для стрижнів і для смуги, які враховують зміни опору ґрунту в різні пори року.

$$\rho_{\text{расч.ст.}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot k_{\text{п.ст.}}; \rho_{\text{расч.ст.}} = 1,45 \cdot 40 = 58 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (6.1)$$

4. Опір розтіканню струму для одиночного стрижневого поглибленого заземлення можна визначити за допомогою емпіричних формул або графічних методів, враховуючи глибину закладення і діаметр стрижня.

$$R_g = \rho_{\text{н.з.}} / 2\pi \cdot l \cdot \left[\ln(2l/d) + 1/2 \cdot \ln((4t+l)/(4t-l)) \right], \quad (6.2)$$

де t – відстань від поверхні землі до середини стрижня;

h_b – величина заглиблення стрижнів;

$l_{\text{ст}}$ – довжина труб.

$$R_T = 58 / 2 \cdot 3,14 \cdot 2,75 \cdot \left[\ln(2 \cdot 2,75 / 0,8) + 1/2 \cdot \ln((4 \cdot 2,18 + 2,5) / (4 \cdot 2,18 - 2,75)) \right] = 8,46 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

5. Визначаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів.

$$n_{\text{см.}} \cdot \eta_{\text{э.см.}} = \frac{R_T}{R_3}; \quad (6.3)$$

$$n_{\text{см.}} = \frac{8,46}{(4 \cdot 0,66)} = 4 \text{ шт}. \quad (6.4)$$

6. Довжина з'єднуючої смуги (або з'єднуючого проводу) для заземлювальної системи визначається залежно від конкретних умов і може бути розрахована за допомогою відомих формул або визначена відповідно до нормативних документів.

Для розташування по контуру:

$$L = a \cdot n; \quad (6.5)$$

$$L = 6 \cdot 4 = 24 \text{ м}$$

7. Визначаємо опір горизонтального заземлювача, прокладеного на глибині h від поверхні землі, за формулою:

$$R_z = \rho_{nz} / 2\pi \cdot L \cdot \ln[2L^2 / (b_1 \cdot h)], \quad (6.6)$$

де b_1 – ширина смужової сталі, із якої виготовлено горизонтальний заземлювач.

$$R_z = 58 / 2 \cdot 3.14 \cdot 24 \cdot \ln[2 \cdot 24^2 / (0,66 \cdot 0,8)] = 38,9 \text{ Ом}.$$

8. Обчислюємо загальний опір заземлюючого пристрою за формулою:

$$R_s = R_T \cdot R_z / (n \cdot R_z \cdot h_e + R_e \cdot \eta_z), \quad (6.9)$$

де η_z – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача.

$$R_s = 8,46 \cdot 38,9 / (4 \cdot 38,9 \cdot 0,8 + 8,43 \cdot 0,55) = 2,84 \text{ Ом}.$$

Отримане значення опору штучного заземлення не перевищує допустимого значення опору захисного заземлення

$$R_z \leq R_{z.\text{норм.}} (2,84 \leq 4).$$

Таким чином, умову захисного заземлення виконано.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кулінченко В. Р. Випарювання і випарні апарати у розрахунках і конструюванні : Навч. посібник / В. Р. Кулінченко, В. Г. Мирончук. – Київ : Кондор, 2006. – 392 с.
2. Класифікація випарних апаратів [Електронний ресурс] // U Distance Learning. – Режим доступу : <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266112/index.html#p1>
3. Процеси, апарати та устаткування виробництв галузі : конспект лекцій / укл. Ю. М. Давидюк. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. – Ч. II. Теплові процеси. – 128 с.
4. Обладнання технологічних процесів фармацевтичних та біотехнологічних виробництв : навч. посібн. / М. В. Стасевич, А. О. Миляннич, І. О. Гузьова [та ін.]; за ред. В. П. Новікова. – Вінниця : Нова Книга, 2012. – 408 с.
5. Чорнобильський І. І. Випарні установки / І. І. Чорнобильський. – Київ : Вид-во Київського ун-ту, 1990. – 262 с.
6. Чепурний М. М. Розрахунки тепломасообмінних апаратів : навчальний посібник / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 129 с.
7. 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.
8. Круглова Н. О. Утилізація шламів виробництва титанооксидних пігментів як засіб зниження техногенного навантаження на довкілля : дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 / Н. О. Круглова. – Шостка, 2014. – 148 с.

9. 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.
10. Коваленко І.А., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. – Київ: Воля, 2006. – 253 с.
11. 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.
12. Поперечний А.М., Черевко О.І., Гаркуша В.Б., Кирпиченко Н.В., Ласкіна Н.А. Процеси і апарати харчових виробництв. – К.: «Центр учбової літератури», 2007. – 304 с.
13. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 155 с.
14. Процеси та обладнання хімічних технологій. Базові принципи теорії тепломасообміну: практикум з кредитного модуля : навч. посіб. / уклад.: С.В. Гулієнко, Я.В. Гробовенко. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 120 с.
15. Шалугін В.С., Шмандрій В.М. Процеси та апарати промислових технологій. – К.: «Центр учбових технологій», 2007. – 392 с.
16. 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.
17. 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.

18. 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.
19. 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.
20. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. [для студ. закл. вищ. освіти]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 233 с.
21. 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>
22. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.
23. КСК автоматизація [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.kck.ua/dir.html>
24. ПАТ «Сумихімпром». Головний сайт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://sumykhimprom.com.ua/dioksid-titana-i-pigmenty/>