Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота бакалавра

рівень вищої освіти__перший (бакалаврський) рівень_____

на тему__Підвищення технологічних характеристик очищення технічного тетрахлориду титану__

Виконав: студент _*4*_курсу, гр. *6.1362-м-з*
___Пальчевський Іван Анатолійович
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Металургія*__
(шифр і назва)

Керівник _Карпенко Г.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент Нестеренко Т.М.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2026 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський) рівень*

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *металургія*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь

"____" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Пальчевському Івану Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Підвищення технологічних характеристик очищення технічного тетрахлориду титану
керівник роботи (проєкту) *Карпенко Г.В., к. т. н., доц.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" грудня 2025 року № 1831-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *28.05.2026 р.*
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*: 1 Теоретичні основи очищення тетрахлориду титану; 1.1 Види очищення тетрахлориду титану; 1.2 Хімічне, дистиляційне та ректифікаційне очищення тетрахлориду титану; 1.3 Апаратурно-технологічна схема очищення технічного тетрахлориду титану; 2 Розрахунок колони ректифікації для переробки технічного тетрохлориду титану; 2.2 Матеріальний баланс процесу ректифікації; 2.3 Розрахунок ректифікаційної колони; 2.3.3 Розрахунок геометричних розмірів колони; 2.4 Розрахунок теплового балансу і куба-випарника; 3 Охорона праці та техногенна безпека; 3.1 Техніка безпеки цеху ректифікації тетрахлориду титану*
5 *Презентаційний матеріал 13 слайдах (на 13 сторінках)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
1 Теоретичні основи очищення тетрахлориду титану	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
2 Розрахунок колони ректифікації для переробки технічного тетрохлориду титану	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
3 Охорона праці та техногенна безпека	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., завідувач кафедри*	

7. Дата видачі завдання: *01.03.2025 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*1 Теоретичні основи очищення тетрахлориду титану*		
2	*2 Розрахунок колони ректифікації для переробки технічного тетрохлориду титану*		
3	*3 Охорона праці та техногенна безпека*		

Студент _____ *І.А. Пальчевський*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Г.В. Карпенко*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: 81 с., 3 частини, 9 рисунків, 11 таблиць, 19 посиланнь.

ТИТАН, ХЛОР, ХЛОРАТОР, ТИТАНОВИЙ ШЛАК, ДІЛЬНИЦЯ ХЛОРУВАННЯ, ПАРОГАЗОВА СУМІШ.

Мета роботи – розрахувати відділення хлорування у складі цеху для отримання тетрахлориду титану відповідно до завдання

У загальній частині розглянуто теоретичні основи існуючих технологій отримання тетрахлориду титану, зроблено вибір технологічної схеми виробництва для проєктованого відділення.

У спеціальній частині наведено розрахунки матеріального та теплового балансу процесу хлорування, а також виконано розрахунок соляного хлоратора. Зроблено вибір основного та допоміжного обладнання.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розроблено методи охорони праці, промислової санітарії та протипожежної безпеки. Також наведено розрахунок тиску при вибуху суміші оксиду вуглецю.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ТЕТРАХЛОРИДУ ТИТАНУ 8
1.1 Види очищення тетрахлориду титану 8
1.2 Хімічне, дистиляційне та ректифікаційне очищення тетрахлориду титану 9
1.3 Апаратурно-технологічна схема очищення технічного тетрахлориду титану 15
2 РОЗРАХУНОК КОЛОНИ РЕКТИФІКАЦІЇ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ТЕХНІЧНОГО ТЕТРОХЛОРИДУ ТИТАНУ 21
2.1 Вихідні дані 21
2.2 Матеріальний баланс процесу ректифікації 22
2.3 Розрахунок ректифікаційної колони 25
2.4 Розрахунок теплового балансу і куба-випарника 36
2.5 Розрахунок конденсатори повітряного охолодження 44
2.6 Вибір і розрахунок основного і допоміжного обладнання 49
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 67
3.1 Техніка безпеки цеху ректифікації тетрахлориду титану 67
3.2 Виробнича санітарія в цеху ректифікації 71
3.3 Протипожежна безпека в цеху ректифікації 73
3.4 Визначення повітрообміну в цеху ректифікації в літній та перехідний періоди 75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 80

ВСТУП

У зв’язку з розвитком нових галузей промисловості виникла необхідність у таких рідкісних металах, як титан, ніобій, тантал, цирконій, ванадій, германій, кремній та ін. У вихідній сировині ці метали, як правило, перебувають у окисленій формі. Відсутність задовільних методів отримання рідкісних металів безпосередньо з їх оксидів стала причиною бурхливого розвитку хлорної металургії. При розкритті вихідної сировини хлором утворюються хлориди. Хлориди рідкісних металів є активними сполуками, які легко очищуються та перетворюються на метали, оксиди й інші речовини, що мають самостійне значення.

Тетрахлорид титану ($TiCl_4$) - типовий продукт хлорної металургії. Промислове виробництво $TiCl_4$ у нашій країні було першим у хлорній металургії рідкісних металів. Його освоєння засвідчило народження хлорної металургії як самостійної галузі промисловості. Основи технології та апаратурне оформлення процесів виробництва тетрахлориду титану стали фундаментом для подальшої розробки й упровадження хлорних методів отримання інших рідкісних металів.

Промислове виробництво $TiCl_4$ організовано на титаномагнієвих комбінатах. У менших масштабах його як побічну продукцію отримують при хлоруванні лопаритового концентрату — джерела сполук ніобію, танталу та рідкісноземельних металів.

Завдяки багатьом своїм винятковим властивостям титан став найважливішим конструкційним матеріалом у вітчизняній техніці. Держава підтримала розвиток титанової промисловості, стимулювала споживання титану різними галузями та забезпечила тим самим умови, коли нарощування обсягів виробництва сприяло зниженню витрат і вартості титанових напівфабрикатів, а це, у свою чергу, робило титан дедалі доступнішим для широкого застосування.

На початок нинішньої кризи обсяг промислового виробництва титану та його сплавів у нашій країні перевищив загальний рівень виробництва

США, Японії, Англії, Німеччини, Франції, КНР. Була розроблена й освоєна у промислових масштабах широка номенклатура сплавів, злитків і напівфабрикатів, яка, попри певні розбіжності у стандартах, за багатьма аспектами відповідала світовому рівню якості.

Накопичений значний досвід у машинобудуванні вже значною мірою сприяв руйнуванню міфу про титан як матеріал, незручний для механічної обробки, зварювання, формування тощо. Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що в Україні були створені всі умови для прориву титану на рівень широкого загальнопромислового застосування.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ТЕТРАХЛОРИДУ ТИТАНУ

1.1 Види очищення тетрахлориду титану

При нормальних умовах тетрахлорид титану являє собою безбарвну рідину з температурою плавлення – 24,0 °С і кипіння 136,6 °С. Молекула має тетраедричну форму, неполярний. Тетрахлорид титану є діелектриком. Які концентруються в тетрахлориді титану домішки можна розділити на дві основні групи: неорганічні й органічні. До неорганічних домішок відносяться:

- елементарні гази: N_2, O_2, Ar, Cl_2;

- з'єднання неметалів: HCl, CO_2, $COCl_2$, COS, SO_2, CS_2, $SOCl_2$, SO_2Cl_2, $POCl_3$;

- з'єднання металів; $SiHCl_3$, $SiCl_4$, $SnCl_4$, $VOCl_3$, $TiCl_3Br$, $AlCl_3$, $TiOCl_2$, $NbCl_5$, $FeCl_3$, $ZrCl_4$.

Домішки органічних сполук поділяють на три класи:

- граничні хлор замісні вуглеводні: CH_2Cl_2, $CHCl_3$, C_2H_5Cl, $C_2H_4Cl_2$, CCl_4, $C_2H_3Cl_3$, C_2H_4, C_2Cl_6;

- ароматичні вуглеводи: C_6Cl_6, $C_6H_4Cl_2$;

- похідні оцтової кислоти: $CH_2ClCOCl$, $CHCl_2COCl$, CCl_3COCl.

Тетрахлорид титану містить домішки у всіх агрегатних станах. Переважна більшість домішок в значній мірі відрізняється від $TiCl_4$ температурами плавлення і кипіння. Отже, вони можуть бути відокремлені відомими фізичними методами, наприклад, фільтруванням, центрифугуванням, адсорбцією, дистиляцією, кристалізацією [7].

1.2 Хімічне, дистиляційне та ректифікаційне очищення тетрахлориду титану

Застосування фільтрування і центрифугування важко з кількох причин. Тверді домішки знаходяться в $TiCl_4$ в тонкодисперсному стані; вони, як $TiCl_4$, легко взаємодіють з вологою повітря, утворюючи в'язкі суміші. Це вимагає створення ефективних, високопродуктивних герметичних апаратів.

Адсорбційне очищення не застосовують у зв'язку з відсутністю способів регенерації сорбентів.

Метод кристалізації в протитечіних колонах дозволяє досить ефективно очистити тетрахлорид титану від багатьох домішок, однак він вимагає великих енергетичних витрат. Апаратура для його застосування конструктивно складніша.

Найбільш економічні і прості в технічному відношенні методи дистиляції та ректифікації. Методом дистиляції відокремлюють тверді і частина газоподібних домішок (елементарних газів: CO_2, SO_2, HCl, COS, $SOCl_2$); ректифікацією – основна кількість газів і рідкі сполуки (CS_2, $SOCl_2$, SO_2Cl_2, $SiHCl_3$, $SiCl_4$, $Si_3O_2Cl_8$, органічні сполуки) [3].

Дистиляцією (простою перегонкою) називається процес послідовного випаровування і конденсації рідини. При нагріванні в пар переходять леткі речовини, які згодом конденсуються на охолоджуваних поверхнях. Висококиплячі домішки (їх температура кипіння вище температури кипіння $TiCl_4$) концентруються в залишок від випаровування. Таким методом можуть бути відокремлені лише розчинні речовини, температура кипіння яких сильно відрізняється від температури кипіння $TiCl_4$ ($FeCl_3$, AlOCl, $NbCl_5$, $ZrCl_4$, $NbOCl_3$), і все нерозчинні тверді домішки [3].

Ректифікація – це процес поділу домішок за допомогою одночасно і багаторазово повторюваних часткових випаровування і конденсації. Сутність цього процесу можна прослідкувати за допомогою t-x-y діаграми (рис. 1.1) на прикладі двокомпонентної суміші. Нагріваючи вихідну суміш до температури

кипіння (точка a), отримуємо, що знаходиться в рівновазі з рідиною пар (точка b). Відбір і конденсація цього пара дають рідина складу X_2, збагачену низько киплячим компонентом. Нагріваючи цю рідину далі до температури кипіння t_2 (точка c), отримаємо пар (точка d), концентрація якого дає рідина з ще більшою концентрацією низкокипячий компонента має склад X_3 і так далі. В підсумку можна отримати рідина (дистилят), що представляє собою практично чистий низкокипячий компонент [3].

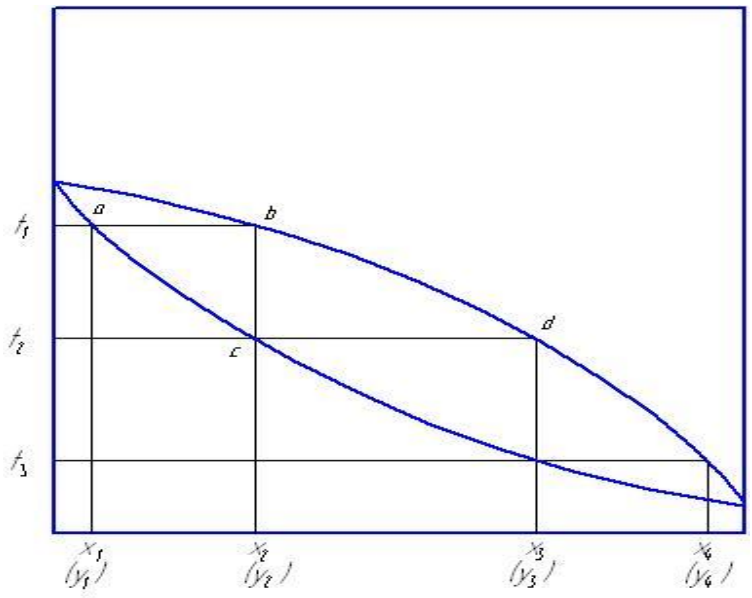


Рисунок 1.1 – Розділення бінарної суміші методом ректифікації на t-x-y діаграмі

Більш наочно процес ректифікації можна розглянути на схемі тарельчатої колони. Колона представляє собою вертикальну трубу розділену на безліч рівних відрізків з горизонтально розташованими перехідниками-тарілками. Кожна тарілка має велику кількість отворів для проходу пара і переливні трубки для зливу сконденсованої рідини. На нижню тарілку надходить пара з випарника, так званого куба; на виході з колони пар направляється в дефлегматор, де конденсується.

Випаровування рідини на тарілці відбувається за рахунок тепла конденсації пари. З пара конденсується і переходить в рідину переважно

висококиплячий компонент, конденсація якого надходить тарілку ширяючи вище, ніж у рідини на тарілці. При рівності теплоти випаровування одного моля низкокиплячого компонента необхідно сконденсувати один моль высококиплячого компонента, тобто фази на тарілці обмінюються еквімалярними кількостями компонентів.

В загальних рисах, пар, який представляє собою на виході з куба-випарника майже чистий высококиплячий компонент, по мірі руху в гору все більше збагачується низькокиплячим компонентом і залишає верхню тарілку колони у вигляді майже чистого низкокиплячого компонента, який практично повністю переходить у парову фазу на шляху пара від куба-випарника до верхньої частини колони [3].

На виході з колони пар повністю конденсується. Частина конденсованої рідини направляють на зрошення колони – цю рідину називають флегмою; інша частина виходить з процесу – її називають дистилятом.

Вихідну рідину подають в середню частину колони на ту тарілку, де концентрація видаляється домішки в рідині дорівнює концентрації вихідної рідини.

Основною характеристикою компонентів суміші, що використовується при поділі методом ректифікації, є коефіцієнт відносної летючості або коефіцієнт поділу. Він являє собою відношення концентрації низкокиплячої домішки і основного компонента в паровій і рідкій фазах в стані рівноваги. Його розраховують за формулою:

$$\alpha = (Y_i/Y_{TiCl4}) / (X_i/ X_{TiCl4}) \quad (1.1)$$

де X_i і Y_i – мольна частка і-того компонента в рідини і рівноважному з нею парі; X_{TiCl4} і Y_{TiCl4} – мольна частка основного компонента - $TiCl_4$ в рідини і пари.

Якщо $\alpha > 1$, то парова фаза збагачується домішками; якщо $\alpha < 1$, то домішка концентрується в кубової рідини. Системи, у яких коефіцієнт розділення в усьому діапазоні концентрації компонентів зберігається постійним,

називаються ідеальними. Такими звичайно є суміші речовин з близькими властивостями, наприклад $TiCl_4$ – $VOCl_3$, $TiCl_4$ – $SiCl_4$, $TiCl_4$ – $SnCl_4$, $TiCl_4$ – CCl_3COCl та інші.

Ідеальні системи підкоряються закону Рауля, згідно з яким:

$$P_i' = X_i \times P_i \qquad (1.2)$$

де P_i – тиск пари і-того компонента;

X_i – концентрація компонента в рідині;

P_i' - тиск пари чистого компонента.

Чим вище коефіцієнт відносної летючості, тим більш повно поділяються компонентні суміші. Разом з тим, ефективність поділу великою мірою залежить від співвідношення між кількістю стікаючої рідини і піднімається пара. Це співвідношення називають флегмовим числом (R). Для зміцнювальної (верхньої від живильної тарілки) частини колони флегмове число дорівнює відношенню сумарної кількості флегми до кількості живильної рідини. Колона має максимальну роздільню здатність, тобто коли сконденсований пар повертається в колону у вигляді флегми, і флегмове число близько до нуля, тому у виробничих умовах витримують оптимальний відбір дистиляту (виходячи з норм якості кінцевого продукту). Розділову здатність ректифікаційної колони характеризують числом теоретичних тарілок для тарілчастих колон або числом одиниць переносу для насадочних колон [5].

При роботі колони в робочому режимі, тобто з безперервним живленням і безперервним відбором продуктів, кількість теоретично необхідних тарілок визначається не тільки процесами конденсацыъ вихідного і кінцевого продуктів, але і витратою вихідної рідини (тобто продуктивністю колони), ступенем відбору продуктів і флегмовим числом. Ефективність поділу зменшується відповідно із збільшенням продуктивності колони і зменшенням флегмового числа.

Чим менше коефіцієнт відносної летючості домішки, тим більш високе флермовое число вимагається для її відділення. Тому відокремлювати близько

киплячі домішки ректифікацією не економічно. Для таких домішок застосовують хімічні методи очищення. У виробництві тетрахлориду титану хімічним методом відокремлюють трихлороксид ванадію.

Для хімічного очищення трихлороксида ванадію використовують в даний час такі реагенти, як сірководень, трихлорід титану, полімери ненасичених вуглеводнів і деякі інші речовини.

Застосування сірководню пов'язане з великими труднощами, так як, не дивлячись на те, що сірководень є дуже активним реагентом і добре облягає трихлороксид ванадію в кубовий залишок, він є дуже токсичним і вибухонебезпечним матеріалом, що вимагає дуже високої культури виробництва.

Більш прогресивним і широко розповсюдженим способом є очищення трихлоридом титану. Останній отримують у вигляді змішаної солі з хлоридом алюмінію шляхом взаємодії алюмінієвої пудри з тетрахлоридом титану у присутності хлору як реагенту:

$$Al + TiCl_4 + Cl_2 \rightarrow TiCl_3 \cdot AlCl_3$$

Змішана сіль є активним відновлювачем:

$$3TiCl_4 \cdot AlCl_3 + 3VOCl_3 = 3VOCl_2\downarrow + 3TiCl_4 + AlCl_3\downarrow$$

Недолік цього процесу полягає в тому, що алюмінієва пудра вибухонебезпечна, технологія приготування змішаної солі (пудра нижчих хлоридів титану (НХТ)) складна і включає кілька операцій. Реакція взаємодії алюмінію з $TiCl_4$ носить автокаталитичний характер і при високій інтенсивності процес стає вибухонебезпечним. Пульпа НХТ, яку отримують, непостійна за складом, що дестабілізує процес очищення. Поява надлишкового $AlCl_3$ в пульпі веде до зниження якості тетрахлориду титану, а наявність спеціального переділу одержання реагенту-відновника ускладнює процес.

Застосування полімерів не насичених вуглеводнів знижує вміст ванадію до 0,0003 % (при необхідному 0,0002 %), в добавок контактування тетрахлориду титану з поліетиленом і поліпропіленом, які є основними реагентами, незмінно призводять до підвищення в тетрахлориді титану загального вмісту вуглецю -

шкідливої домішки при виробництві губчастого титану. Спосіб відносно дорогий, тому що використовуються дорогі полімери після спеціальної підготовки-деструкції (обробка парафіном).

На сьогоднішній день існує спосіб, випробуваний як в лабораторних, так і у виробничих умовах. У відомому способі очищення тетрахлориду титану в якості реагенту відновника вводять продукт переробки нафти – бітум, розфасований в поліетилені в брикети по 2...5 кг. Бітум класифікується по температурі плавлення, по глибині входу в бітум металевої голки діаметром 1 мм при температурі 20 ^{0}С і тиском на голку рівним 1Па. Найбільш підходящим для виробництва є бітум 70/30, де 70 – температура плавлення в ^{0}С, 30 – глибина входу голки в мм. При температурі вище 70 ^{0}С бітум швидко переходить в рідку фазу і легко розчиняється в тетрахлориді титану. Поліетилен розчиняється в тетрахлориді разом з бітумом і не чинить значного негативного впливу на очищення. Бітум являє собою готовий матеріал з постійними характеристиками, який як реагент відновник у процесі очищення тетрахлориду титану від ванадію показав високу хімічну активність, яка полягає у властивостях не насичених вуглеводів, які є в його складі. Існування високої електронної щільності за рахунок подвійний і потрійний зв'язки забезпечує ефективне відновлення $V^{5+}+e \rightarrow V^{4+}$, при цьому сполуки ванадію міцно утримуються вуглецевої основою бітуму, не засмічуючи цільової тетрахлорид титану. Реагент не вибухонебезпечний, очищення протікає стабільно, що призводить до зменшення витрат, так як немає необхідності в спеціальному обладнанні для підготовки відновника до процесу очищення [6].

Використання способу очищення тетрахлориду титану від ванадію вуглеводневим відновником (бітумом), дозволяє скоротити кількість операцій з підготовки реагенту-відновника і спростити його, а результати випробувань свідчать про його високу стабільність. Крім того, використання даного способу, скорочує собівартість очищення, зменшує кількість обладнання для підготовки реагенту, стабілізує якість очищеного тетрахлориду титану за змістом алюмінію

і збільшує технологічність відходів за рахунок створення сухого продукту, який не виділяє газ, з низьким вмістом хлор-іона.

Випробування у виробничих умовах даного реагенту показали, що його використання на сьогоднішній день є технологічно оптимальним і економічно найбільш вигідним у порівнянні зі всіма існуючими способами очищення тетрахлориду титану від трихлороксида ванадію.

1.3 Апаратурно-технологічна схема очищення технічного тетрахлориду титану

Для очищення технічного тетрахлориду титану (ТТТ) від домішок застосовуємо триступеневу схему очищення, представлену на рисунку 1.2. вона включає хімічну дистиляцію і ректифікаційне очищення [3].

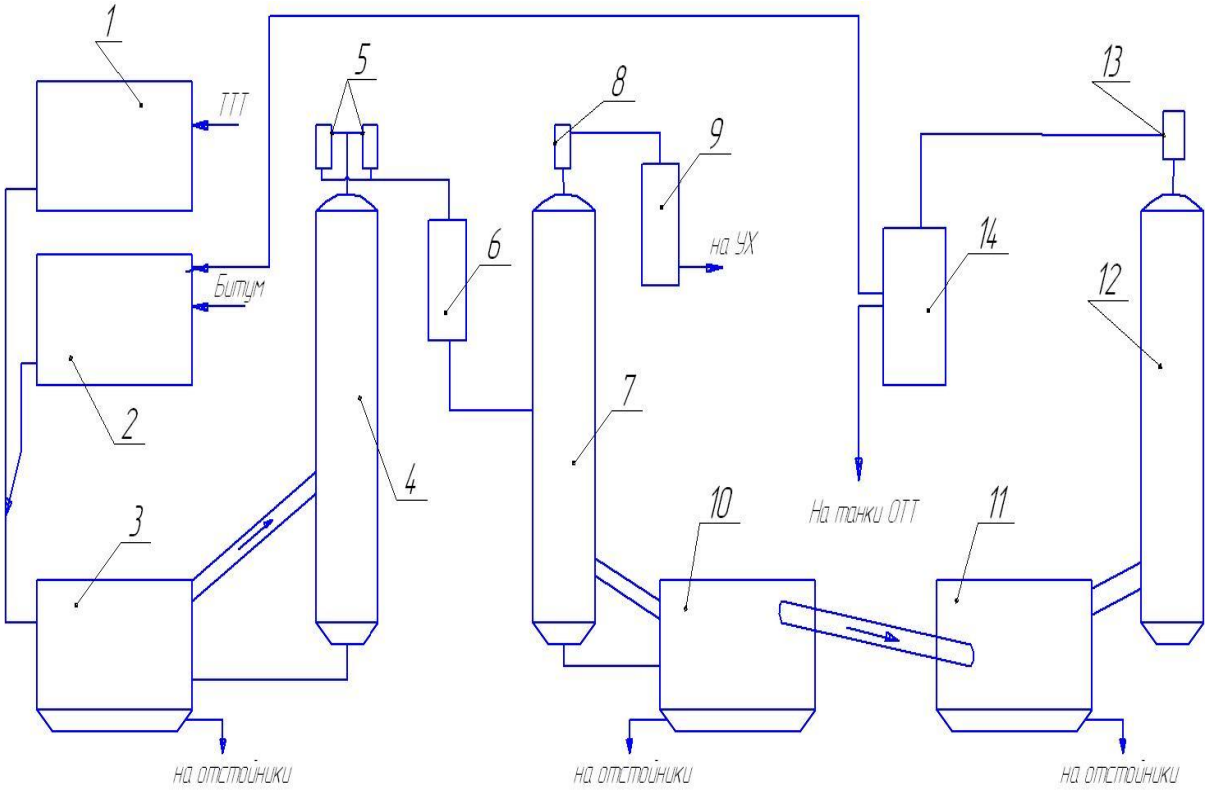
Технічний тетрахлорид титану, отриманий на ділянці хлорування, закачується в напірний бак 1, який в свою чергу живить куб-випарник 3. Куб підживлюється постійно по мірі випаровування з нього рідини. В лінію підживлення куба 3 з напірного бака 1 врізана лінія з бака 2, дозування розчину бітуму в тетрахлориде титану. Бітум адсорбує в кубі випарнику трихлороксид ванадію, осідає в кубовий залишок разом з твердими домішками і основною частиною висококиплячих домішок технічного тетрахлориду титану.

Разом з значною кількістю основного продукту (близько 70 % тетрахлориду титану) кубовий залишок виводиться періодично з куба випарника через нижню лінію безпосередньо в піч випарювання пульпи (ПВП).

Пари тетрахлориду титану з куба-випарника 3 направляються в колону дистиляції 4.

У виробництві тетрахлориду титану застосовують насадкові і тарілчасті ректифікаційні колони. В якості насадки використовують керамічні або титанові кільця Рашига діаметром 15 мм і шириною 20 мм, які навалом насипаються на зітчатой поверхні.

В тарілчастих колонах використовують два види контактних пристроїв: провальні гратчасті тарілки і сітчасті тарілки з переливом.



1 - напірний бак ТТТ; 2 - бак дозування розчину бітуму; 3 - куб-випарник колони дистиляції; 4 - колона дистиляції; 5 - повітряний конденсатор-дефлегматор; 6 - бак-збірник; 7 - перша колона ректифікації; 8 - повітряний конденсатор-дефлегматор першої колони ректифікації; 9 - бак-збірник легкокипящего дистиляту; 10 -куб-випарник першої колони ректифікації; 11 - куб-випарник колони другий ректифікації; 12 - колона другий ректифікації; 13 - повітряний конденсатор-дефлегматор колони другий ректифікації; 14 - накопичувальний бак ОТТ

Рисунок 1.2 – Апаратурно-технологічна схема очищення ТТТ

Сітчаста стандартна тарілка являє собою плоский перфорований лист з переливним пристроєм для рідини; пристрій має вигляд планки з регульованою висотою. Між зливний перегородкою вище розміщеної тарілки і переливною планкою створюється гідрозатвор.

Порівняно з сітчастими тарілками сітчасті більш складні і трудомісткі у виготовленні. Однак ці тарілки мають більш високий к. п. д, який до того ж в широкому діапазоні паровий навантаження залишається практично постійним. Так як у виробництві мають місце різкі і часті коливання електричної потужності кубів випарників, то це перевага сітчастих тарілок дуже істотно.

Особливістю колон для ректифікації та дистиляції очищення є висока герметичність.

Колона дистиляції 4 оснащена унизу трьома насадочними тарілками з кільцями Рашига і десятьма сітчастими тарілками з переливом вгорі. Дана система очищення технічного тетрахлориду титану потрібна для більш ретельного видалення твердих домішок, з допомогою кілець Рашига і висококиплячих домішок, з допомогою сітчастих тарілок з переливом. Виходячи з колони пари потрапляють в повітряний конденсатор дефлегматор 5.

Для конденсації парів тетрахлориду титану застосовують два типи конденсаторів-дефлегматорів: водоохолоджувані кожухотрубні та апарати повітряного охолодження (вертикальні та горизонтальні). Водоохолоджувані дефлегматори мають суттєві недоліки: малий термін служби (не більше одного року), можливість попадання води в труби з $TiCl_4$ і в колону.

На всіх колонах застосовують апарати повітряного охолодження, термін їх служби 10...12 років. Незважаючи на великі габарити, обумовлені значно меншим коефіцієнтом тепловіддачі повітря–метал (40...80 кДж /($м^2$·год·ºС)), вони більш вигідні і не викликають аварійних ситуацій.

Сконденсована рідина з дефлегматора 5 зливається в бак-збірник 6, живить колону 7. Врізка лінії бака 6 в колону 7 знаходиться приблизно в середній частині колони і ділить її на дві частини – вичерпну і зміцнюючу. Пари першої колони ректифікації, збагачені низкокиплячими домішками, конденсуються в конденсаторі-дефлегматорі 8 і у вигляді легкокиплячого дистиляту виводяться в бак збірник 9, з якого відбираються на переробку в сольовому хлораторе на ділянку хлорування. Очищений від низькокиплячих домішок тетрахлорид титану, зливаючись з сітчастими тарілках з переливом,

потрапляє в куб випарник 10 першої колони ректифікації. По мірі накопичення, рідина по лінії переливу живить куб-випарник 11 колони другий ректифікації 12. Друга щабель ректифікації призначена для очищення тетрахлориду титану від висококиплячих домішок, які залишилися після дистиляційного очищення, це хлорид титану, хлорид заліза, $Si_3O_2Cl_8$, ароматичні вуглеводні. Колона другий ректифікації так само оснащена сітчастими тарілками з переливами і має тільки зміцнюючу частину, але для підтримки однакового тиску у кубах-випарниках 10,11, колони першої та другої ректифікації виконані з однаковою висотою. Після конденсації пари із колони 12 потрапляють у конденсатор - дефлегматор 13, очищений тетрахлорид титану (ОТТ) зливається в накопичувальний бак 14. При заповненні ОТТ в баку 14 (близько ⅔ обсягу), по лінії зливу рідина направляється споживачам. Постійний рівень ОТТ в баку 14 є достатнім для приготування розчину з бітумом в баці 2. Необхідна для цього частина продукту періодично відбирається з бака 14 для приготування розчину з бітумом, решті очищений тетрахлорид титану йде споживачам. Рідина, що виходить з конденсатора-дефлегматора 13, має температуру не менше 90 ^{0}C. Дана температура рідини є достатньою для розчинення бітуму. При зупинці ділянки і в зимовий час, коли температура рідини, що подається з бака 14 нижчою від необхідної для розчинення бітуму, тетрахлорид титану підігрівається безпосередньо в баці 2 виробничим пором. Для цього бак 2 забезпечений зовнішньої сорочкою з підведеною лінію для виробничого пара.

Оскільки тетрахлорид титану не проводить струм, його нагрівають у кубах - випарниках відкритими нагрівачами з ніхрому

Кожна колона має свою систему розподілу рідини, що виходить з її конденсатора-дефлегматора. Гребінка першої колони ректифікації відрізняється тим, що не має оглядового ліхтаря і обвідний лінії регулювання подачі флегми. Всі колони мають для зручності обслуговування і розміщення основного устаткування приблизно однакову висоту, незалежно від якості тарілок.

На апаратурно-технологічній схемі показана одна, так звана гілка очистки. Для зручності обслуговування, ремонту та безперервного виробництва, у цеху встановлено повністю ідентичні дві гілки очистки. Напірні і накопичувальні баки обслуговують як першу, так і другу гілку. Обидві гілки можуть працювати окремо або в результаті виробничої необхідності – спільно.

Обладнання для розчинення бітуму в тетрахлориді титану так само має два дублюючих один одного бака, кожен з яких може подавати суспензію на обидва куба-випарника колон дистиляції. Поки з одного йде дозування розчину, другий завантажується бітумом, потім заливається рідиною і перемішується для більш швидкого розчинення. Час приготування розчину завантаження 8...10 хв.

Баки наповнюються виходячи з восьми годинний безперервної дозування розчину. На 1 тонну ТТТ використовується 1,0 кг бітуму. Суспензія готується з розрахунку 115 грам бітуму на 1 літр тетрахлориду. Місткість бака становить приблизно 300 літрів. Повний розрахунок обладнання завантаження буде наведено в інших розділах.

В цеху знаходиться переділ обробки кубових залишків. Бак накопичувач кубових залишків першої та другої ректифікації є так само основним баком дихальних систем ділянки. Всі баки ділянки безпосередньо, а колони через гідрозатвори, з'єднані з даними баком. Дихальна система забезпечує розрядження у всіх ємностях, крім кубів-випарників, а також служить для зменшення контакту рідини з повітрям. Щодо заповнення бака, кубові залишки перекачуються в баки відстійники оснащені лінією зливу рідини. З лінії зливу сконцентрований кубовий залишок направляється в печі випарювання пульпи (ПВП). Печі ПВП працюють по черзі. Одна з печей знаходиться на випарюванні, завантажена на ⅔ свого обсягу кубовими залишками дистиляції та ректифікації. Після заповнення піч стає на інтенсивне випарювання, а на другу перемикаються лінії завантаження. З пульпи випаровується рідина і вона перетворюється в кек. Після повного осушення кека, він вивантажується в кюбеля і відвантажується споживачу. Після вивантаження кеку з печі, вона готується до завантаження, і знаходиться в очікуванні до завантаження попередньої. Насос забезпечує в печах

настояне розрядження і відкачує з печей відходять пари, які конденсуються в холодильнику і зливаються в ємності технічного тетрахлориду титану.

Дана апаратурно-технологічна схема, набагато простіше і ефективніше ніж нині існуючі. Завдяки застосуванню декількох нововведень (аварійні сливи, прямі сливи кубових залишків і так далі) значно поліпшуються техніко-економічні показники, робота ділянки стає стабільною і безпечною.

2 РОЗРАХУНОК КОЛОНИ РЕКТИФІКАЦІЇ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ТЕХНІЧНОГО ТЕТРОХЛОРИДУ ТИТАНУ

2.1 Вихідні дані

Розрахувати процес і колону ректифікації для переробки 38 000 тонн в рік технічного тетрахлориду титану, який одержують на ділянці хлорування.

При дистиляційному очищенні, на колоні дистиляції коефіцієнт втрат вихідного продукту дорівнює 1,212. Даний коефіцієнт враховує: видалення важких домішок з технічного тетрахлориду титану; видалення основної частини висококиплячих компонентів; осадження в кубовий залишок ванадію (його основну частину); втрати тетрахлориду титану при періодичному виході кубових залишків з куба-випарника. До складу тетрахлориду титану, очищеного дистиляцією і хімічним осадженням ванадію розчином бітуму, входять наступні домішки, %: ванадій (V) 0,0004; кремні3й (Si) 0,014; алюміній (Al) 0,0003; кисень (O) 0,0031, та фосген ($COCl_2$) 0,0017.

Дані речовини знаходяться в тетрахлориді титану у вигляді сполук. У перерахунку на молекулярну масу, кількість домішок і основного продукту становить, %:

$$V \text{ у вигляді } VOCl_3 = 0{,}0004 \cdot (50{,}95 + 16 + 35{,}457 \cdot 3) / 50{,}95 = 0{,}0014;$$

$$Si \text{ у вигляді } SiCl_4 = 0{,}014 \cdot (28{,}09 + 35{,}457 \cdot 4) / 28{,}09 = 0{,}0847;$$

$$Al \text{ у вигляді } AlCl_3 = 0{,}0003 \cdot (26{,}98 + 35{,}457 \cdot 3) / 26{,}98 = 0{,}0015;$$

$$O_2 \text{ у вигляді } TiCl_2 = 0{,}0031 \cdot (47{,}9 + 16 + 35{,}457 \cdot 2) / 16 = 0{,}0261;$$

$$COCl_2 = 0{,}0017,$$

тоді кількість $TiCl_4 = 100 – (0{,}0014 + 0{,}0847 + 0{,}0015 + 0{,}0261 + 0{,}0017) = 99{,}8846$

Згідно з прийнятою виробничою регламентацією кількість домішок в очищеній тетрахлориді титану марки ОТТ-0 становить, %:

ванадію – 0,0002;

кисню – 0, 0003;

кремнію – 0,0002;

фосгену– 0,0002.

Для отримання кубового залишку містить ≤ 0,0002% Si, приймаємо розподіл складових тетрахлориду титану в процесі ректифікації (кубовий залишок і дистилят, %):

тетрахлорид титану 99 (1);

тетрахлорид кремнію 1 (99);

оксохлорид ванадію 6 (94).

Фосген повністю переходить в дистилят; інші домішки повністю переходять в кубовий залишок.

2.2 Матеріальний баланс процесу ректифікації

Розрахунок ведемо на 1000 кг вихідного тетрахлориду титану:

- в кубовий залишок переходять кг:

998,846 · 0,99 = 988,857 $TiCl_4$; 0,847 · 0,01 = 0,008 $SiCl_4$; 0,014 · 0,06 = 0,001 VOC_{l3}; 0,015 $AlCl_3$; 0,261 $TiOCl_2$.

Всього: 989,142 кг.

- у дистилят переходять, кг:

998,846 - 988,857 = 9,989 $TiCl_4$; 0,847 - 0,008 = 0,839 $SiCl_4$; 0,014 - 0,001 = 0,013 $VOCl_3$; 0,017 $COCl_2$.

Всього: 10,858 кг.

На підставі наведених розрахунків складаємо матеріальний баланс ректифікації (таблиця 2.1)

Таблиця 2.1 – Матеріальний баланс процесу ректифікації

Прихід			Витрата		
Назва	Кількість		Назва	Кількість	
	кг	%		кг	%
Вихідний тетрахлорид титану	1000,0	100,0	Кубовий залишок	989,142	100
В тому числі:			У тому числі:		
$TiCl_4$	998,846	99,8846	$TiCl_4$	988,857	99,9712
$SiCl_4$	0,847	0,0847	$SiCl_4$	0,008	0,0008
$VOCl_3$	0,014	0,0014	$VOCl_3$	0,001	0,0001
$AlCl_3$	0,015	0,0015	$TiOCl_2$	0,261	0,0264
$TiOCl_2$	0,261	0,0261	$AlCl_3$	0,015	0,0015
$COCl_2$	0,017	0,0017	Дистилят	10,858	100
			У тому числі:		
			$TiCl_4$	9,989	91,9968
			$SiCl_4$	0,839	7,7270
			$VOCl_3$	0,013	0,1197
			$COCl_2$	0,017	0,1565
Разом	1000,0	100,0	Разом	1000	

Добовий матеріальний потік матеріалів процесу першої ректифікації встановлюємо наступним чином:

Приймаємо середньорічний фонд робочого часу колони 355 днів. Для забезпечення заданої продуктивності за одну добу необхідно переробити вихідного тетрахлориду титану 38 000/355 = 107,04 т/добу.

При отриманні кубового залишку:

$$989{,}142 \cdot 107{,}04/1000 = 105{,}877 \text{ т.}$$

Утворюється за одну добу дистиляту:

$$107{,}04 - 105{,}877 = 1{,}127 \text{ т.}$$

Складаємо добовий матеріальний баланс (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 - Добовий матеріальний баланс ректифікації

Прихід		Витрата	
Найменування	Кількість, т.	Найменування	Кількість, т.
Вихідний тетрахлорид титану	107,04	Кубовий залишок Дистилят	105,877 1,127
Разом	107,04	Разом	107,04

Кількість титану у вихідному тетрахлориді титану:

$$107,04 \cdot 0,252 = 26,974 \text{ т.}$$

Кількість титану в кубових залишків:

$$105,877 \cdot 0,9997 \cdot 47,9 / 189,9 = 26,698 \text{ т.}$$

Кількість титану в дистилляте:

$$26,974 – 26,698 = 0,276 \text{ т.}$$

Складаємо добовий баланс титану (таблиця 2.3)

Таблиця 2.3 – Добовий баланс титану

Прихід		Витрата	
Найменування	Кількість, т.	Найменування	Кількість, т.
Титан у вихідному тетрахлориде титану	26,974	В кубових залишків У дистилляте	26,698 0,276
Разом	26,974	Разом	26,974

2.3 Розрахунок ректифікаційної колони

Для розрахунку приймаємо такі умови. Склад вихідного тетрахлориду титану вважаємо складається з двох компонентів – тетрахлориду титану і тетрахлорид кремнію з урахуванням висококиплячих складових, тобто 99,913 % $TiCl_4$ і 0,0870% $SiCl_4$. Приймаємо зміст $SiCl_4$ в кубових залишків рівним 0,0009%, в дистилляте 7,804%, продуктивність колони по вихідній суміші 5,28 т/ч.

Теоретичне кількість тарілок розраховуємо аналітичним і графічним методами.

Спочатку використовуємо аналітичний метод розрахунку. Визначаємо молекулярні концентрації легкокипящего компонента $SiCl_4$ у вихідному тетрахлориде титану X_f, дистиллятоpe X_p і в кубових залишків X_w за формулами:

$$X_f = (A_f/M_A)/(A_f/M_A+B_f/M_B), \quad (2.1)$$

$$X_p = (A_p/M_A)/(A_p/M_A+B_p/M_B), \quad (2.2)$$

$$X_w = (A_w/M_A)/(A_w/M_A+B_w/M_B), \quad (2.3)$$

де A_f, A_p, A_w – вміст летючого компоненту відповідно до вихідної рідини, дистилляте і кубових залишків % (по масі);

B_fB_f, B_w – вміст висококиплячих складової відповідно до вихідної рідини, дистилляте і кубових залишків, % (по масі);

M_A, M_B – молекулярні маси летючого компоненту і висококиплячих складової.

Отримуємо:

X_f = 0,0870/169,9 / (0,0870/169,9 + 99,913/183,7) = 0,00097 моль/моль,

X_p = 7,804/169,9 / (7,804/169,9 + 92,196/189,7) = 0,08635 моль/моль,

X_w = 0,0009/169,9 / (0,0009/169,9 + 99,9991/189,7) = 0,00001 моль/моль

Так як теплоти випаровування компонентів дуже близькі, розрахунок ведемо без застосування теплових діаграм.

Визначаємо середні молекулярні маси вихідного тетрахлориду титану M $_f$, дистиляту Mp і кубового залишку Mw, за формулами:

$$M_f = (A_f \cdot M_A + B_f \cdot M_B)/100, \quad (2.4)$$

$$M_p = (A_p \cdot M_A + B_p \cdot M_B)/100, \quad (2.5)$$

$$M_w = (A_w \cdot M_A + B_w \cdot M_B)/100, \quad (2.6)$$

$$M_f = (0{,}087 \cdot 169{,}9 + 99{,}913 \cdot 189{,}7) / 100 = 189{,}68,$$

$$M_p = (7{,}804/169{,}9 + 92{,}196 \cdot 189{,}7) / 100 = 188{,}15,$$

$$M_w = 189{,}7 \text{ (вважаємо як чистий)}$$

Переводимо продуктивність ректифікаційної колони по масі в мольну, використовуючи формулу:

$$q_f = q_{fB} / M_f, \quad (2.7)$$

де q_f = 5280 кг/год – прийнята продуктивність по масі ректифікаційної колони вихідної рідини;

$$q_f = 5280/189{,}68 = 27{,}84 \text{ моль/год}$$

Спільним рішенням управління матеріальних балансів процесу ректифікації і легкокипящих складової визначаємо мольную продуктивність колон по дистилляту управління:

$$q_p = q_f \cdot ((X_f - X_w)/(X_p - X_w)), \quad (2.8)$$

$$q_p = 27{,}84 \ ((0{,}00097 - 0{,}00001) / (0{,}08635 - 0{,}00001)) = 0{,}31 \text{ моль/год}$$

Мольну продуктивність колон по кубовому залишку визначаємо за формулою:

$$q^{Bp}=q_p \cdot M_p \,, \qquad (2.9)$$

$$q_p = 0{,}31 \cdot 189{,}15 = 58{,}64 \text{ кг/год}$$

Мольную продуктивність колони по кубовому залишку визначаємо по рівнянню:

$$q_w = q_f - q_p \,, \qquad (2.10)$$

$$q_w = 27{,}84 - 0{,}31 = 27{,}53 \text{ моль/год}$$

Продуктивність колони по кубовому залишку знаходимо з виразу:

$$q_w{}^{в}=q_w \cdot M_w \,, \qquad (2.11)$$

$$q_w = 27{,}53 \cdot 189{,}7 = 5222{,}44 \text{ кг/год}$$

Знаходимо залежність відносної $SiCl_4$ від температури. Рівноважні склади рідини (в чисельнику) і пари (у знаменнику) і відносна летючість в системі $TiCl_4$ - $SiCl_4$ наведено в таблиці 2.4 [5].

Таблиця 2.4 - Рівноважні склади рідини і пара, відносна летючість

Температура °С	57,2	64,0	75,8	88,9	116,5	123,4	129,9	136,5
$SiCl_4$, % (моль)	$\frac{100}{100}$	$\frac{79}{96}$	$\frac{49,5}{91,2}$	$\frac{30,4}{83,2}$	$\frac{8,7}{46,4}$	$\frac{6,5}{33,2}$	$\frac{2,8}{18,5}$	$\frac{0}{0}$
Відносна летючість	-	6,4	10,4	11,4	9,1	7,1	7,9	0

Визначимо середню відносну летючості $SiCl_4$ за формулою:

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 + ... + \alpha_n) / \sum n \,, \qquad (2.12)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$ – відносна летючість при різних температурах

$\sum n$ - кількість значень, взятих при різних температурах;

$$\alpha = (6,4 + 10,4 + 11,4 + 9,1 + 7,1 + 7,9) / 6 = 8,7$$

Знаходимо молярную концентрацію $SiCl_4$ в парах за формулою:

$$Y_f = \alpha \cdot X_f / (1 + (\alpha - 1) X_f), \quad (2.13)$$

$$Y_f = 8,7 \cdot 0,00097 / (1 + (8,7 - 1) \cdot 0,00097) = 0,0084$$

Визначаємо мінімальне флегмовое число за формулою:

$$R_{min} = (X_p - Y_f)/(Y_f X_f), \quad (2.14)$$

$$R_{min} = (0,08635 – 0,0084) / (0,0084 - 0,00097) = 10,49$$

Приймаємо коефіцієнт надлишку флегми до=2, знаходимо дійсне флегмовое число за формулою:

$$R_д = k R_{min} , \quad (2.15)$$

$$R_д = 2 \cdot 10,49 = 20,98$$

Мольної кількість пари надходять у конденсатор з боку флегми, визначаємо за формулою:

$$q_y = q_p (R_д + 1), \quad (2.16)$$

$$q_y = 0,31 (20,98 + 1) = 6,81 \text{ моль/год;}$$

в одиницях маси розраховуємо за формулою:

$$q_y = q_y \cdot M_p \,, \qquad (2.17)$$

$$q_y = 6{,}81 \cdot 188{,}15 = 1281{,}3 \text{ кг/год}$$

Це ж кількість парів приймаємо для будь-якого перерізу колони.

2.3.1 Розрахунок зміцнювальної частини колони

Мольної кількість флегми, необхідне для зміцнювальної (верхньої) частини колони ректифікації, визначаємо за формулою:

$$q_x = q_y - q_p \,, \qquad (2.18)$$

$$q_x = 6{,}81 - 0{,}31 = 6{,}5 \text{ моль/год.}$$

В одиницях маси кількість флегми зміцнювальної частини колони знаходимо з виразу:

$$q_x = q_x \cdot M_p \,, \qquad (2.19)$$

$$q_x = 6{,}5 \cdot 188{,}15 = 1222{,}99 \text{ кг/год.}$$

Мольної кількість у вичерпній (нижньої) частини колони визначаємо за формулою:

$$q_x = q_f + q_x \,, \qquad (2.20)$$

$$q_x = 27{,}84 + 6{,}5 = 34{,}34 \text{ моль/ч.}$$

Для визначення кількості флегми в одиницях маси в вичерпної частини колони, її мольної значення множать на середню молекулярну масу пари в колоні, обчислену по рівнянню:

$$M_{ср} = (M_p + M_w)/ 2 , \quad (2.21)$$

$$M_{ср} = (188,15 + 189,7) / 2 = 188,925$$

Тоді знаходимо кількість флегми в вичерпної частини колони по формулі:

$$q_x = q_x \cdot M_{ср} , \quad (2.22)$$

$$q_x = 34,34 \cdot 188,925 = 6487,68 \text{ кг/год}$$

Теоретичне число тарілок для зміцнювальної частини колони визначаємо з виразу:

$$(Є'_y)^{n_y} = ((X_p - d)/(c - X_p)) / ((X_f - d)/(c - X_f)), \quad (2.23)$$

$$c = a + \sqrt{a^2 + b} , \quad (2.24)$$

$$d = a - \sqrt{a^2 + b} , \quad (2.25)$$

$$a = ½ (1 + α/R_д (α - 1) - X_р/ R_д , \quad (2.26)$$

$$b = X_р/ R_д \cdot (α - 1) , \quad (2.27)$$

$$(Є'_y) = (1 + (α - 1) \cdot (c - d)) / ((α - 1) \cdot d + 1) , \quad (2.28)$$

де $Є'_y$ – коефіцієнт розділеної для зміцнювальної частини колони;

c, d – коефіцієнт розподілу для зміцнювальної частини колони;

a, b – розрахункові коефіцієнти;

α – середня відносна летючість легкокипящего компонента для зміцнювальної частини колони:

$$a = ½ (1 + 8,7/20,98(8,7 - 1) - 0,08635/20,98) = 0,525,$$

$$b = 0,08635/(20,98(8,7 - 1)) = 0,0005,$$

$$c = 0,525 + \sqrt{0,2756 - 0,0005} = 1,0495,$$

$$d = 0,525 - \sqrt{0,2756 - 0,0005} = 0,00047,$$

$$Є_y = 1 + (8,7 - 1) \cdot (1,0495 - 0,00047) / ((8,7 - 1) \cdot 0,00047 + 1 = 9,05,$$

$$(9{,}05)^{n_y} = \left(\frac{0{,}08635 - 0{,}00047}{1{,}0495 - 0{,}08635}\right) / \left(\frac{0{,}00097 - 0{,}00047}{1{,}0495 - 0{,}00097}\right) = 186{,}98,$$

$$ny = 2{,}35$$

Приймаємо число тарілок рівним 3.

2.3.2 Розрахунок вичерпної частини колони

Визначаємо дійсне флегмове число вичерпної частини колони по співвідношенню:

$$R_u = 1 + (R_д + 1) \cdot \frac{X_f - X_w}{X_p - X_f}, \quad (2.29)$$

$$R_u = 1 + (20{,}98 + 1) \cdot \frac{(0{,}00097 - 0{,}00001)}{(0{,}08635 - 0{,}00097)} = 1{,}247$$

Відносна летючість для вичерпної частини колони (α_u) приймаємо відповідної середньої температурі суміші рідини і пари (123,4 °С). При цій температурі суміші рідини і пари $\alpha_u = 7{,}1$.

Теоретичне число тарілок для вичерпної частини колони визначаємо за формулами:

$$(Є'_u) = \frac{X_f - d_u}{C_u - X_f} / \frac{(X_w - d_u)}{(C_u - X_w)}, \quad (2.30)$$

$$з_u = a_u + \sqrt{a^{2u} - b_u}, \quad (2.31)$$

$$d_u = a_u - \sqrt{a^{2u} - b_u}, \quad (2.32)$$

$$a_u = ½ [1 + \alpha_u/R_u (\alpha_u - 1) - X_w/R_u], \quad (2.33)$$

$$b_u = X_u / R_u(\alpha - 1), \quad (2.34)$$

$$Є'_u = 1 + (\alpha_u - 1) / [(з_u - d_u) / (\alpha_u - 1)d_u + 1] \quad (2.35)$$

де Є' – приведений коефіцієнт для вичерпної частини колони;

$з_u$, d_u – коефіцієнти розподілу для вичерпної частини колони;

a_u b_u – розрахункові коефіцієнти.

Розраховуємо число тарілок вичерпної частини:

$$a_u = ½ [1 + 7,1/1,247 \cdot (7,1 - 1) - 0,00001/1,247] = 0,97,$$

$$b_u = 0,00001/(7,1 - 1) \cdot 1,247 = 0,0000013,$$

$$c_u = 0,97 + \sqrt{0,97^2 - 0,0000013} = 1,9399993,$$

$$d_u = 0,97 - \sqrt{0,97^2 - 0,0000013} = 0,0000007,$$

$$Є'_u = 1 + (7,1 - 1) \cdot \frac{1,9399993 - 0,0000007}{(7,1 - 1)0,0000007 + 1} = 12,83,$$

$$(12,83)\left({}^{nu} = \frac{0,00097 - 0,0000007}{1.9399993 - 0,00097} \right) / \left(\frac{0,00001 - 0,0000007}{1,9399993 - 0,00001} \right) = 450,$$

$$n_u = 2,4$$

Приймаємо число тарілок рівним 3.

2.3.3 Розрахунок геометричних розмірів колони

Дані графічного розрахунку беремо за основоположні для подальшого розрахунку колон.

Далі застосовуємо графічний метод розрахунку. Для розрахунку використовуємо дані, отримані при аналітичному методі розрахунку.

Визначаємо величину відрізка В за формулою:

$$B = X_p/(R_д + 1) , \qquad (2.36)$$

$$B = 0,08635/(20,98 + 1) = 0,0039$$

Будуємо графік для визначення теоретичного числа тарілок для зміцнювальної (рисунок 2.1) і вичерпної (рисунок 2.2) частин колони. Крива для зміцнювальної і пряма для вичерпної y = f(x) частин колони є рівноважною складової між рідиною і пором. Відрізок a,b є робочою лінією для зміцнює, c, d – для вичерпної частин колони; 1 – 5 на рисунку 2.2 – теоретичне число тарілок зміцнює і вичерпної частин колони відповідно.

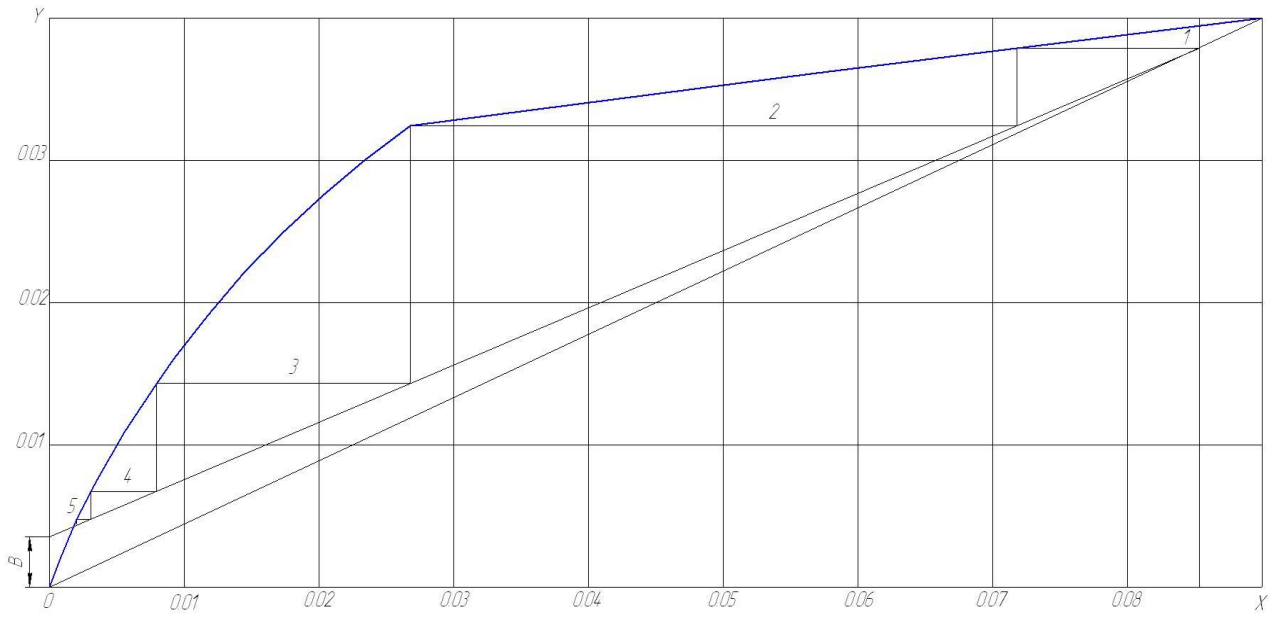


Рисунок 2.1 - Графічне визначення теоретичного числа тарілок для зміцнювальної частини колони

Висоту колони визначаємо наступним чином. Приймаємо відстань між тарілками 30 мм, товщину тарілки 4 мм, коефіцієнти корисної дії ситчатой тарілки з переливом для зміцнювальної частини колони $\eta_в = 0,44$; для вичерпної частини колони $\eta_в = 0,22$ [9].

Для визначення практичного числа тарілок в зміцнює і вичерпної частини колони додаємо по дві тарілки для підігріву рідини до температури кипіння вихідної суміші. Практичне число тарілок для зміцнювальної (верхньої) частини колони визначаємо за формулою:

$$n_y = (n_y / \eta_y) + 2 , \quad (2.37)$$

$$n_y = 5/0,44 + 2 = 13,36;$$

Приймаємо число тарілок рівним 14.

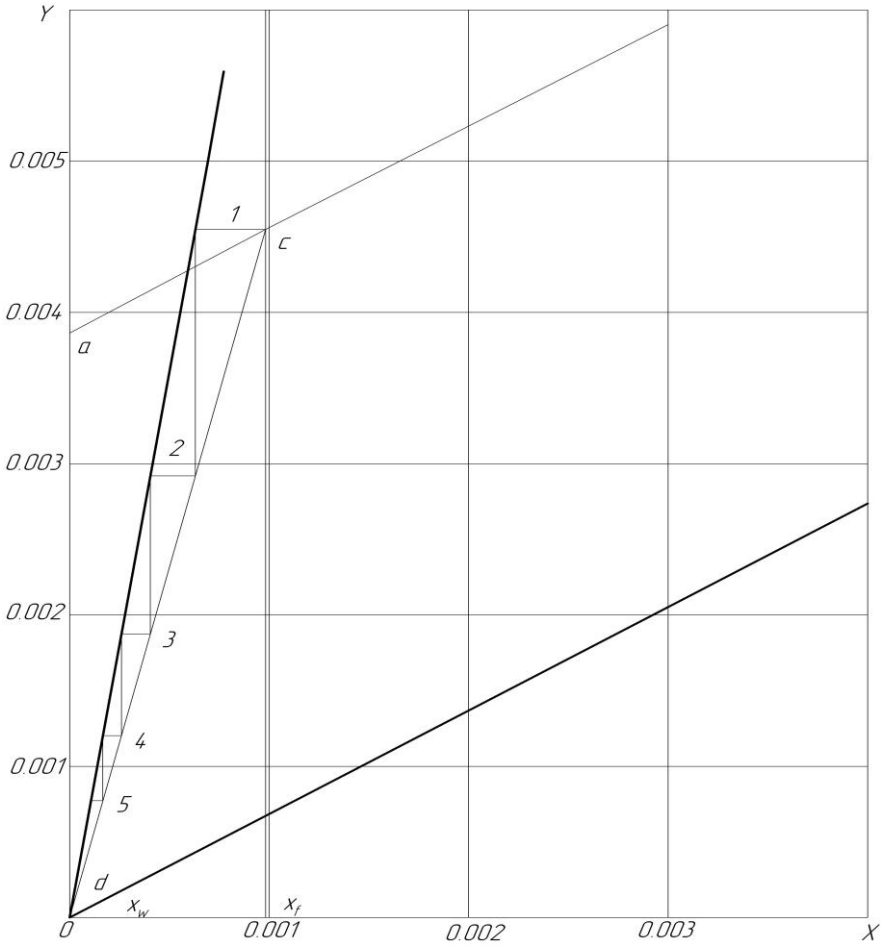


Рисунок 2.2 - Графічне визначення теоретичного числа тарілок для вичерпної частини колони

Практичне число тарілок для вичерпної (нижньої) частини колони знаходимо з виразу:

$$n_y = (n_u / \eta_u) + 2, \quad (2.38)$$

$$n_y = 5/0{,}22 + 2 = 24{,}72;$$

Приймаємо число тарілок рівним 25, виходячи з розрахунку вихідну рідина подаємо в колону на тарілку № 25.

Приймаємо відстань від верхньої тарілки до кришки колони 1,4 м; відстань від днища колони до нижньої тарілки 0,750 м. висоту зміцнювальної частини колони визначаємо за формулою:

$$h_y = S \cdot n_y + b \cdot n_y + h_k , \quad (2.39)$$

де S – відстань між тарілками, м;

b – товщина тарілки, м;

h_k – відстань від верхньої тарілки до кришки колони, м;

$$h_y = 0,3 \cdot 14 + 0,04 \cdot 14 + 1,4 = 6,16 \text{ м}$$

Висоту вичерпної частини колони знаходимо з виразу:

$$h_u = S \cdot n_y + b \cdot n_y + h_H , \quad (2.40)$$

де h_H – відстань від нижньої тарілки до днища колони, м:

$$h_u = 0,3 \cdot 25 + 0,04 \cdot 25 + 0,750 = 9,25 \text{ м}$$

Висоту колони визначаємо за співвідношенням:

$$H = h_y + h_u , \quad (2.41)$$

$$H = 6,16 + 9,25 = 15,41 \text{ м}$$

Внутрішній діаметр колони визначаємо наступним чином.

Для розрахунку приймаємо щільність пара в колоні 2,8 кг/м^3; швидкість пара в колоні 0,5 м/с . Знаходимо середню молекулярну масу пари за формулою:

$$M_{ср} = (M_f + M_p) / 2 , \quad (2.42)$$

$$M_{зр} = (189,68 + 188,15) / 2 = 188,915$$

Визначаємо обсяг пара проходить через колону по співвідношенню:

$$V_п = q_n \cdot \frac{Mср}{рп} , \quad (2.43)$$

де рп- щільність пара в колоні, кг/м^3;

$$V_п = 6,81 \cdot 188,915 / 2,8 = 459 \text{ м}^3/\text{с}$$

Розраховуємо діаметр колони за формулою:

$$D = \sqrt{4\,Vп/Пw\,3600}, \qquad (2.44)$$

де w – швидкість пара в колоні, м/с;

$$D = \sqrt{4 \cdot 459/3\,,14 \cdot 0,5 \cdot 3600} = 0,569 \text{ м} = 569 \text{ мм}.$$

Приймаємо стандартний діаметр колони 590 мм.

2.4 Розрахунок теплового балансу і куба-випарника

Для розрахунку куба-випарника складаємо тепловий баланс ректифікаційної колони. Розрахунок ведемо на годинну продуктивність колони.

Прихід тепла. Кількість тепла, що вноситься вихідним тетрахлоридом титану, визначаємо наступним чином. Приймаємо дані для розрахунку: продуктивність колони: 5280 кг/год; теплоємність $TiCl_4$: 0,787 кДж/(кг·К); температура $TiCl_4$ надходить у колону 50°С. Кількість тепла, що вноситься вихідним продуктом розраховуємо за формулою:

$$Q = m \cdot c \cdot t\,, \qquad (2.45)$$

де m – продуктивність колон, кг/год;

с – теплоємність $TiCl_4$, кДж/(кг · К);

t – температура $TiCl_4$ надходить у колону, К.

$$Q_1 = 5280 \cdot 0,787 \cdot 323 = 207768 \text{ кДж/год}$$

Кількість теплоти, що вноситься флегмою, оцінюємо наступним чином. Приймаємо дані необхідні для розрахунку; теплоємність флегми 0,795 кДж/(кг · К); температура кипіння флегми ($SiCl_4$) 57,2 °С.

Кількість дистиляту з матеріального балансу ректифікації становить:

$$m_у = 5280 \cdot 10{,}858/1000 = 57{,}33 \text{ кг/год}$$

Кількість флегми розраховуємо за формулою:

$$m_ф = m_у \cdot R_д \,, \qquad (2.46)$$

$$m_ф = 57{,}33 \cdot 20{,}98 = 1202{,}78 \text{ кг/год};$$

тоді кількість тепла, що вноситься флегмою знайдемо з виразу (2.45):

$$Q_2 = 1202{,}78 \cdot 0{,}795 \cdot 330{,}2 = 54695 \text{ кДж/год}$$

Тоді загальний прихід тепла:

$$Q_{прих} = 207768+54695 = 262463 \text{ кДж/год}$$

Витрата тепла. Кількість тепла буря дистилятом і випаровується у колоні флегмою, знаходимо наступним чином.

Для розрахунку приймаємо приховану теплоту випаровування флегми 167,5 кДж/год; теплоємність флегми 0,795 кДж/(кг · К); кількість флегми і дистиляту знаходимо з формули:

$$m_{фу} = m_у + m_у \cdot R_д \,, \qquad (2.47)$$

$$m_{фу} = 57{,}33 + 57{,}33 \cdot 20{,}98 = 1260{,}11 \text{ кг/год}$$

Тоді кількість тепла буря дистилятом і випаровується флегмою знаходимо з виразу:

$$Q_3 = m \cdot (r + c \cdot t_к) \qquad (2.48)$$

де $t_к$ – температура кипіння флегми, К; r – прихована теплота випаровування $SiCl_4$, кДж/кг:

$$Q_3 = 1260{,}11 \cdot (167{,}5 + 0{,}795 \cdot 330{,}2) = 268371 \text{ кДж/год}$$

Кількість тепла буря кубовим залишком, оцінюємо наступним чином.

Приймаємо теплоємність кубового залишку ($TiCl_4$) 0,705 кДж/(кг · К); температуру її кипіння 136,6 °С. Кількість кубового залишку з матеріального балансу:

$$m_к = 5280 \cdot 989{,}142 / 1000 = 5222{,}67 \text{ кг/год}$$

Тоді кількість тепла, що буря кубовим залишком, знайдемо за формулою (2.45):

$$Q_4 = 5222{,}67 \cdot 0{,}705 \cdot 409{,}6 = 502959 \text{ кДж/год.}$$

Кількість теплоти втрачається колоною в навколишнє середовище, розраховуємо наступним чином.

Вихідні дані для розрахунку:

Діаметр, мм:

внутрішньої колони 590

зовнішньої колони 600

зовнішнього теплоізолюючого шару асбозурита 718

Висота колони, м. 15,41

Температура °С:

середня пара в колоні 96,4

зовнішнього повітря (середня) 15

зовнішня асбозурита 35

Коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/(м · К) 55

Знаходимо середню температуру стінки колони з виразу:

$$t_{ср} = (t_В + t_п) / 2 , \quad (2.49)$$

де $t_в$ – середня температура пари в колоні;

t_n – температура зовнішнього шару асбозурита;

$$t_{ср} = (96,4 + 35) / 2 = 66 \text{ °C}$$

Визначаємо коефіцієнт теплопровідності асбозурита за формулою:

$$\lambda = a + b \cdot t_{ср} , \quad (2.50)$$

де a = 0,162;

b = 0,000168 – експериментально визначені довідкові коефіцієнти теплопровідності;

$$\lambda = 0,162 + 0,000168 \cdot 66 = 0,1731 \text{ Вт/(м · К)}$$

Втрати тепла в навколишнє середовище у визначаємо за співвідношенням:

$$Q_ц = 2,73 (t_1 - t_2) h / \frac{1}{\lambda_{ст}} \lg \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\lambda_{асб}} \lg \frac{d_{асб}}{d_1} , \quad (2.51)$$

де h – висота колони, м;

$\lambda_{ст}$, $\lambda_{асб}$ – коефіцієнт теплопровідності сталі і асбозурита, Вт/(м^2 ·К);

d_2, d_1 – внутрішній і зовнішній діаметр колони, м

$$Q_5 = 2{,}73 \cdot (96{,}4 - 15) \cdot 15{,}41 / \frac{1}{55} \lg \frac{0{,}6}{0{,}59} + \frac{1}{0{,}1731} \lg \frac{0{,}718}{0{,}6} = 5253 \text{ Вт}$$

або:

$$Q_5 = 5523 \cdot 3{,}6 = 18911 \text{ кДж/год}$$

Кількість тепла, що втрачається кубом-випарником в навколишнє середовище, оцінюємо наступним чином.

На ректифікаційної колони встановлюємо куб-випарник з нержавіючої сталі. Приймаємо розміри куба: внутрішній діаметр 2500 мм; висота 1900 мм; товщина стінки 6 мм; товщина теплоізоляційного шару асбозурита 15 мм [10].

Втрати кількості тепла складаються з втрат через циліндричну стінку і втрат через дно і кришку куба.

Для розрахунку приймаємо:

Температура °С:

кубової рідини 140

поверхні куба 40

зовнішнього повітря 15

Діаметр, м:

внутрішній куба 2,5

зовнішній куба 2,512

зовнішній шар асбозурита 2,662

Поверхня кришки куба, м2 4,91

Середню температуру стінки куба знаходимо за формулою (2.49):

$$t_{ср} = (140 + 40) / 2 = 90 \text{ °C}$$

Визначаємо коефіцієнт теплопровідності асбозурита за формулою (2.50), беручи довідкові коефіцієнти a = 0,162; b = 0,00018:

$$\lambda = 0{,}162 + 0{,}00018 \cdot 90 = 0{,}178 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Втрати тепла в навколишнє середовище визначаємо з виразу:

$$Q_6 = \frac{2{,}73 \cdot (t_1 - t_2) \cdot h}{\left(\frac{1}{\lambda_{ст}} \cdot \lg\frac{d_1}{d_2}\right) + \left(\frac{1}{\lambda_{асб}} \cdot \lg\frac{d_{асб}}{d_1}\right)} + \frac{2F(t_1 - t_2)}{\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{асб}}{\lambda_{асб}}}, \quad (2.52)$$

де F – площа поверхні площини куба, м2;

$$Q_6 = \frac{2{,}73 \cdot (40-15) \cdot 15.41}{\left(\frac{1}{55} \cdot \lg\frac{2{,}621}{2{,}5}\right) + \left(\frac{1}{0{,}178} \cdot \lg\frac{2{,}662}{2{,}512}\right)} + \frac{2 \cdot 4{,}91 \cdot (40-15)}{\frac{0{,}006}{55} + \frac{0{,}075}{0{,}184}} = 3497 \text{ Вт};$$

або:

$$Q_6 = 3497 \cdot 3{,}6 = 12589 \text{ кДж/год}$$

Всього втрачається тепла в навколишнє середовище:

$$Q_5 + Q_6 = 18911+12589=31500 \text{ кДж/год}$$

Загальний витрата складає:

$$Q_{витрат} = 268371+502959+31500=802830 \text{ кДж/год}$$

Необхідно ввести тепла за рахунок нагрівання кубової рідини:

$$Q = 802830 - 262463=540367 \text{ кДж/год}$$

Складаємо тепловий баланс ректифікаційної колони (таблиця 2.5)

Таблиця 2.5 – Тепловий баланс ректифікаційної колони

Прихід			Витрата		
Стаття	Кількість		Стаття	Кількість	
	кДж	%		кДж	%
Тепло вноситься вихідним тетрахлоридом титану	207768	25,89	Тепло уносимое дистилятом і випаровується флегмою	268371	33,43
Тепло вноситься флегмою	54695	6,81	Тепло уносимое кубової рідиною	502959	61,65
Тепло від нагрівання кубової рідини	540367	67,3	Втрати тепла колоною в навколишнє середовище	18911	2,35
			Втрати тепла кубом в навколишнє середовище	12589	1,57
	802830	100		802830	100

Визначаємо електричну потужність, споживану кубом, приймаючи коефіцієнт запасу потужності 1,5, за формулою:

$$P = QK / 3600 , \quad (2.53)$$

де К – коефіцієнт запасу потужності;

$$P = 540367 \cdot 1,5 / 3600 = 225 \text{ кВт}$$

Розміри нагрівачів куба визначаємо наступним чином.

Кубова рідина нагрівається відкритими нихромовыми спіралями, вертикально натягнутими між спеціальними утримувачами з діелектричних підставок.

Приймаємо дані для розрахунку:

Напруга надходить на нагрівачі, В 380

Перетин ніхромового стрічки, мм ^{2} 20х2

Питомий електричний опір

ніхрому при 20 °С, Ом · м 1,1

Температурний коефіцієнт 0,0009

Визначимо питомий електричний опір ніхрому при робочій температурі 300 °С за формулою:

$$P_t = p_o + \alpha \cdot t_{ср} \ , \qquad (2.54)$$

де p_o – питомий електричний опір;

α – температурний коефіцієнт;

$t_{ср}$ – робоча температура ніхрому.

$$P_t = 1,1 + 0,0009 \cdot 300 = 1,37 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Площа поперечного перерізу стрічки $S = 20 \cdot 2 = 40$ мм^2.

Довжину стрічки визначаємо за формулою:

$$l = U2 \cdot S/P \cdot p_t \ , \qquad (2.55)$$

де U – напруга надходить на нагрівач;

$$l = 3802 \cdot 40/225 \cdot 1,37 = 18738 \text{ мм} = 187,38 \text{ м}$$

Відстань між верхнім і нижнім власниками спіралі 0,5 м. на кожному нагрівачі натягнуто 6 спіралей, кількість нагрівачів 6; кількість спіралей $6 \cdot 6 = 36$ шт. необхідну кількість стрічки для спіралей $l_н = 187$ решті ніхром необхідний для з'єднання спіралей зварюванням на нагрівачах, діаметр спіралі 0,15 м [10].

Необхідне число витків спіралі знаходимо за формулою:

$$n = I/\pi \cdot d_c \ , \qquad (2.56)$$

де d_c – діаметр спіралі, м

$$n = 187/3,14 \cdot 0,15 = 397$$

Відстань між витками встановлюємо з виразу:

$$I_в = I_д \cdot n_c/n \,, \qquad (2.57)$$

де $l_д$ – відстань між власниками, см;

n_c – кількість спіралей.

$$l_в = 0{,}5 \cdot 36/397 = 0{,}045 \text{ м}$$

2.5 Розрахунок конденсатори повітряного охолодження

Для охолодження дистиляту і випаровується флегми колони ректифікації використовуємо стандартний конденсатор повітряного охолодження марки $\frac{АВМ - У - 9 - Ж - 16 - Б3 - I}{8 - 1 - 3}$

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі конденсатора і необхідну їх кількість для ситчатой колони діаметром 600 мм

Вихідні дані для розрахунку:

n - кількість труб, шт – 188;

n' – кількість рядів - 8;

H – висота, м – 3;

$d_н$ – діаметр труби зовнішньої, м - 0,026;

$d_в$ – діаметр внутрішньої труби, м - 0,022;

S – товщина стінки, м - 0,002;

λ_2 - теплопровідність сталі 12Х18Н10Т, Вт/(м · К) - 17,5;

G – витрата пара конденсується кг/с при навантаженні куба-випарника 180 кВт - 0,26;

Q – тепловміст теплового потоку Дж/с при потужності куба-випарника 180 кВт – 55068;

P_1 – щільність дистиляту при 130°С, кг/м^3 - 1435,8;

M_1 – в'язкість дистиляту при 130°С, Па · с - 0,380 · 10^3;

r_1 – питома теплота конденсації дистиляту при 130 °С, Дж/кг – 180050;

$З_1$ – теплоємність дистиляту при 130 °С, Дж/(кг · К) - 745,0;

π_1 – коефіцієнт теплопровідності дистиляту, Вт/(м · К) - 0,1152;

P_2 – щільність повітря при 40 °С, кг/$м^3$ - 0,635;

μ_2 – в'язкість повітря при 40 °С, Па·с - 1,898 · 10^5;

$З_2$ – теплоємність повітря при 40 °С, Дж/(кг · К) – 955,0;

π_2 - коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м · К) – 0,0279

Визначимо швидкість повітря при установці одного конденсатора на весь тепловий потік за формулою:

$$\omega = \frac{V_{пов}}{F_{заг}}, \quad (2.58)$$

де $V_{пов}$ – розрахункова швидкість подачі повітря на конденсатор;

$F_{заг}$ – вільний напрям в корпусі конденсатора для проходження повітря, що подається.

Швидкість подачі повітря розраховуємо за формулою:

$$V_{пов} = \frac{Q}{C2 \cdot T \cdot p2}, \quad (2.59)$$

де T = 40- 25 = 15°С – різниця подаваного повітря і охолоджуваного дистиляту;

$$V_{пов} = \frac{55068}{955 \cdot 15 \cdot 0{,}635} = 6{,}05 \text{ м/с}$$

Вільний простір в корпусі знаходимо з виразу:

$$F_{заг} = 2a + 22 \cdot S, \quad (2.60)$$

де а = 0,008 – зазор між крайніми трубками і корпусом, м;

S = 0,036 – міжтрубний простір, м;

$$F_{заг} = 2 \cdot 0{,}008 + 22 \cdot 0{,}036 = 0{,}808 \text{ м};$$

$$\omega = \frac{6{,}05}{0{,}808} = 7{,}48 \text{ м/с}$$

З метою забезпечення нормальної роботи, експлуатація доцільна конденсатора зі швидкістю повітря (8...15) м/с [9]. Так як в проектованому цеху застосовуємо систему припливної вентиляції в зимовий час за рахунок живлення повітрям від повітряних конденсаторів, то швидкість повітря множимо на аеродинамічний коефіцієнт опору вузлів поетапної вентиляції ділянки рівний 1,25:

$$\omega = 7{,}48 \cdot 1{,}25 = 9{,}35 \text{ м/с}$$

У літній час швидкість повітря, що подається залишається незмінною. Переохолодження дистиляту неприпустимо, так як основна його частина відбирається на флегму, тому швидкість повітря, що подається на трубки конденсатора, регулюється так само жалюзями, встановленими між вентилятором і трубками.

Коефіцієнт теплопередачі визначаємо за формулою:

$$К = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{r_1} + \frac{S}{\pi \cdot c} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \qquad (2.61)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі при плівковій конденсації пари;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі повітря;

S/πc – термічний опір стінки зі сталі 12Х18Н10Т;

$1/r_1$ – теплова провідність забруднень внутрішній поверхні трубки, приймаємо рівним 12000 Вт/м^2;

$1/r_2$ – теплова провідність забруднень зовнішньої поверхні трубки, приймаємо 3000Вт/(м^2·К).

Розрахунок коефіцієнта теплопередачі ведемо при робочій потужності куба-випарника за формулою:

$$\alpha_1 = 3{,}78 \cdot \pi \,, \tag{2.62}$$

$$\alpha_1 = 3.78 \cdot 0{,}1152 = 1334 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Коефіцієнт тепловіддачі знаходимо з виразу:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda 2}{d_н} \,, \tag{2.63}$$

де N_u – критерій Нуссельта, розраховуємо за формулою:

$$N_u = 0{,}21 \cdot \xi_y \cdot Re^{0{,}65} \,, \tag{2.64}$$

де $\xi_y = 1$ (при куті 90º) – коефіцієнт кута охолодження труб;

Re – критерій Рейнольдса знаходимо за співвідношенням:

$$Re = \frac{4G}{\pi \cdot d_в \cdot n \cdot \mu 4} \,, \tag{2.65}$$

$$Re = \frac{4 \cdot 0{,}26}{3{,}14 \cdot 0{,}022 \cdot 188 \cdot 0{,}380 \cdot 10} = 210{,}74 \,,$$

$$Nu = 0{,}21 \cdot 1 \cdot 210{,}74^{0{,}65} = 44{,}25 \,,$$

$$\alpha_2 = \frac{44{,}25 \cdot 0{,}0279}{0{,}026} = 47{,}49 \,,$$

$$До = \frac{1}{\frac{1}{1334} + \frac{1}{12000} + \frac{0{,}002}{17{,}5} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{47{,}49}} = 44{,}7 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}$$

Розрахунок среднелогарифмической температури робимо по формулі:

$$\Delta t_{ср} = \frac{T_1 - T_2}{2{,}3 \cdot \lg \frac{T_1}{T_2}}, \quad (2.66)$$

де T_1 = 130 - 20 = 110 °С – різниця температур між парою і охолоджуючим повітрям;

T_2 = 130 - 40 = 90 °С – різниця температур між парою і конденсатом;

$$\Delta t_{ср} = \frac{110 - 90}{2{,}3 \cdot \lg \frac{110}{90}} = 14{,}96$$

Розрахунок необхідної поверхні теплообміну знаходимо з виразу:

$$F = \frac{Q \cdot k'}{K \cdot \Delta t_{ср}}, \quad (2.67)$$

де k = 1,5 – коефіцієнт запасу тепловіддачі;

$$F = \frac{55068 \cdot 1{,}5}{44{,}7 \cdot 14{,}96} = 123{,}5 \text{ м}^2$$

Необхідну кількість конденсаторів типу $\frac{АВМ - В - 9 - Ж - 16 - Б3 - Н}{В - 1 - 3}$ знаходимо з співвідношення:

$$X = \frac{F}{F_0}, \quad (2.68)$$

де F_0 = 440 м^2 - поверхня теплообміну конденсатора

$$X = \frac{123{,}5}{.440} = 0{,}28$$

Необхідно встановити один конденсатор повітряного охолодження.

Технічні показники процесу і колони ректифікації наступні:

Подача вихідного тетрахлориду титану, т/год - 5,28;

Відбір дистиляту, кг/год - 57,33;

Внутрішній діаметр колони, мм – 590;

Загальна висота колони, м - 15,41;

Загальне число тарілок – 39;

Відстань між тарілками, мм - 300;

Лінійна швидкість пари в колоні, м/с – 0,5; Температура °С:

низу колони – 140;

верху колони – 130; Тиск пари, Па:

внизу колони – 26600;

вгорі колони – 1333;

Потужність нагрівачів куба-випарника, кВт – 225;

Кількість повітряних конденсаторів типу : $\frac{\text{АВМ} - B - 9 - \text{Ж} - 16 - \text{БЗ} - \text{Н}}{\text{В} - 1 - 3}$ - 1

2.6 Вибір і розрахунок основного і допоміжного обладнання

Для розрахунку основного і допоміжного обладнання, керуємося розрахунком колони ректифікації, а так само розрахунком процесу ректифікації та відомими виробничими характеристиками допоміжного обладнання. Вищевикладений розрахунок колони ректифікації, виходячи з апаратурно-технічної схеми, був проведений для колони 1-й ректифікації [10].

Колони дистиляції і другий ректифікації встановлюємо однаковими по висоті і діаметру, по розмірам першої колони ректифікації. Потужність кубів-випарників встановлюємо наступним чином.

Складаємо тепловий баланс дистилляционной колони. Розрахунок ведемо на годинну продуктивність колони.

Прихід тепла. Кількість тепла, що вноситься вихідним тетрахлоридом титану, визначаємо наступним чином. Приймаємо дані для розрахунку: продуктивність колони 4100 т/год; теплоємність $TiCl_4$: 0,787 кДж/(кг · К); температура $TiCl_4$ надходить в куб 20 ºС. Кількість тепла, що вноситься вихідним продуктом розраховуємо за формулою (2.48):

$$Q_1 = 4200 \cdot 0{,}787 \cdot 293 = 66108 \text{ кДж/год}$$

Кількість тепла, що вноситься флегмою, оцінюємо наступним чином. Приймаємо, дані необхідні для розрахунку: дійсне флегмовое число беремо мінімальним для колон дистиляції $R_д = 4{,}2$; теплоємність флегми ($TiCl_4$) 0,787 кДж/(кг · К); температура кипіння флегми 136,6 °С.

Кількість дистиляту і флегми становить:

$$m_{д.\,ф} = 4200/1{,}02 = 4118 \text{ кг/год}$$

Кількість флегми розраховуємо за формулою:

$$m_ф = \frac{m_{д.ф.}}{R_д}, \qquad (2.69)$$

$$m_ф = \frac{4118}{4{,}2} = 980 \text{ кг/год}$$

Тоді кількість тепла, що вноситься флегмою знайдемо з виразу (2.48):

$$Q_2 = 980 \cdot 0{,}787 \cdot 409{,}6 = 105354 \text{ кДж/год}$$

Загальний прихід тепла буде:

$$Q_{прих} = 66108 + 105354 = 171462 \text{ кДж/год}$$

Витрата тепла. Кількість тепла, що буря дистилятом і випаровується у колоні флегмою, знаходимо з виразу (2.48):

$$Q_3 = 4118 \cdot (191,8 + 0,787 \cdot 409,6) = 1232535 \text{ кДж/год}$$

Кількості тепла, що буря кубовим залишком, оцінюємо наступним чином.

Приймає теплоємність кубового залишку (основа $TiCl_4$) 0,705 кДж/(кг · К); температуру її кипіння 136,6 °С. Кількість кубового залишку беремо рівним:

$$m_к = 4200 - 4118 = 82 \text{ кг/год}$$

Тоді кількість тепла буря кубовим залишком, оцінюємо за формулою (2.48):

$$Q_4 = 82 \cdot 0,705 \cdot 409,6 = 7897 \text{ кДж/год}$$

При розрахунку кількості тепла втрачається колоною дистиляції в навколишнє середовище, приймаємо вихідні дані для розрахунку як для колони ректифікації з поправкою на середню температуру пари в колоні:

Температура °С:

середня пара в колоні - 137,2

зовнішнього повітря (середня) - 15

зовнішня асбозурита - 40

Знаходимо середню температуру стінки колони з виразу (2.50):

$$t_{ср} = (137,2 + 40)/2 = 88,6 \text{ °C}$$

Для визначення коефіцієнта теплопровідності асбозурита приймаємо: a = 0,162; b = 0,000168, і розраховуємо за формулою (2.51):

$$\lambda = 0,162 + 0,000168 \cdot 88,6 = 0,1769 \text{ Вт/(м · К)}$$

втрати тепла в навколишнє середовище визначаємо за співвідношенням (2.52):

$$Q_5 = \frac{2{,}73\cdot(137{,}2-15)\cdot 15{,}41}{\left(\frac{1}{55}\cdot\lg\frac{0{,}6}{0{,}59}\right)+\left(\frac{1}{0{,}1769}\cdot\lg\frac{718}{600}\right)} = 5773 \text{ Вт};$$

або:

$$Q_5 = 13826 \cdot 3{,}6 = 49776 \text{ кДж/год}$$

Кількість тепла втрачається кубом-випарником в навколишнє середовище оцінюємо наступним чином.

На дистилляционную колону встановлюємо один куб-випарник з нержавіючої сталі. Приймаємо форму і розмір куба: вертикальний циліндр з внутрішнім діаметром 2500 мм; висота 1900 мм; товщина стінки 6 мм; товщина теплоізоляційного шару асбозурита 75 мм. Втрати тепла складаються через циліндричну стінку і через дно і кришку.

Для розрахунку приймаємо:

Температура °С:

кубової рідини – 152;

поверхні куба - 45;

зовнішнього повітря - 15

Інші параметри приймає такі ж як і для куба-випарника колони ректифікації.

Середню температуру стінки куба знаходимо за формулою (2.50)

$$t_{ср} = (152 + 45)/2 = 98{,}5 \text{ °C}$$

Для визначення коефіцієнта теплопровідності асбозурита приймаємо: a = 0,612; b = 0,00018. за формулою (2.51) знаходимо його коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = 0{,}162 + 0{,}00018 \cdot 98{,}5 = 0{,}18 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

втрати тепла в навколишнє середовище кубом-випарником встановлюємо з виразу (2.53)

$$Q_6 = \frac{2{,}73\cdot(152-15)\cdot 1{,}9}{\left(\frac{1}{0{,}1152}\cdot\lg\frac{2{,}612}{2{,}5}\right)+\left(\frac{1}{0{,}18}\cdot\lg\frac{3{,}662}{2{,}512}\right)} + \frac{2\cdot 4{,}91\cdot(152-15)}{\frac{0{,}006}{0{,}115}+\frac{0{,}075}{0{,}18}} = 5773 \text{ Вт};$$

або:

$$Q_6 = 5516 \cdot 3{,}6 = 19857 \text{ кДж/год}$$

Всього втрачається тепла в навколишнє середовище:

$$Q_5 + Q_6 = 49776 + 19857 = 69633 \text{ кДж/год}$$

Загальний витрата тепла становить:

$$Q_{витрат} = 1232535 + 7897 + 69633 = 1310065 \text{ кДж/год}$$

Необхідно підвести тепла за рахунок нагрівання кубової рідини:

$$Q = 1310065 – 171462 = 1138603 \text{ кДж/год}$$

Визначаємо електричну потужність, споживану кубом. Приймаємо коефіцієнт запасу потужності до = 1,5, потужність куба визначаємо по формулі (2.54):

$$P = 1138603 \cdot 1{,}5 / 3600 = 475 \text{ кВт}$$

Приймаємо дані для розрахунку нагрівачів куба-випарника:

напруга, що надходить на нагрівач, В – 380;

перетин ніхромового стрічки, мм - 10х2;

питомий електричний опір ніхрому при 20 ºС, Ом · м - 1,1;

температурний коефіцієнт - 0,0009

Визначаємо питомий електричний опір ніхрому при робочій температурі 370 ºС за формулою (2.55):

$$P_t = 1,1 + 0,0009 \cdot 370 = 1,433 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Довжину стрічки визначаємо за формулою (2.56)

$$l = 3802 \cdot 40/475 \cdot 1,433 = 8485 \text{ мм} = 84,85 \text{ м}$$

Відстань між верхнім і нижнім власниками 0,4 м, діаметр спіралі 0,15 м, необхідну кількість витків знаходимо з співвідношення (2.57):

$$n = 84/(3,14 \cdot 0,15) = 178$$

Залишився ніхром (0,85 м) необхідний для кріплення між собою спіралей зварюванням безпосередньо на нагрівачах.

Відстань між витками встановлюємо з виразу (2.58):

$$l_в = 40 \cdot 36/178 = 8,09 \text{ см}.$$

Аналогічним чином розраховуємо куб-випарник колони другий ректифікації, при однакових геометричних розмірах колон і куба-випарника.

Відомо, що рідина в куб-випарник другий ректифікації потрапляє по лінії переливу з куба-випарника першої колони ректифікації. За попередніми даними, кількість кубового залишку першої колони ректифікації $m_к = 3857$ кг/год. Тоді розрахунок куба-випарника другий ректифікації виробляємо на продуктивність колони рівну 3832 кг/год (25 кг/год – періодичний висновок кубової рідини, передбачений технологічним процесом).

Прихід тепла. Кількість тепла, що вноситься вихідним тетрахлоридом титану, розраховується з урахуванням температури $TiCl_4$, надходить в куб випарник 134 ºС за формулою (2.48)

$$Q_1 = 3832 \cdot 0,787 \cdot 407 = 404115 \text{ кДж/год}$$

Кількість тепла, що вноситься флегмою оцінюємо при дійсному флегмовом числі $R_д = 4,3$. Кількість флегми і дистиляту становить :

$$m_{д.\,ф} = 3832 - 25 = 3807 \text{ кг/год}$$

де 25 кг/год становить періодичний висновок кубової рідини, передбачений технологічними вимогами.

Кількість флегми розраховуємо за формулою (2.69):

$$m_ф = \frac{3807}{4,3} = 885 \text{ кг/год}$$

тоді кількість тепла вноситься флегмою знайдемо з виразу (2.48):

$$Q_2 = 885 \cdot 0,787 \cdot 409,6 = 95178 \text{ кДж/год}$$

Загальний прихід тепла буде:

$$Q_{прих} = 404115 + 95178 = 499293 \text{ кДж/год}$$

Витрата тепла. Кількість тепла, що буря дистилятом і випаровується у колоні флегмою, знаходимо з виразу (2.49):

$$Q_3 = 3807 \cdot (191,8 + 0,787 \cdot 409,6) = 1139451 \text{ кДж/год}$$

Кількості тепла, що буря кубовим залишком $m_к$ = 25 кг/год, знаходимо з співвідношення (2.48):

$$Q_4 = 25 \cdot 0{,}705 \cdot 409{,}6 = 2407 \text{ кДж/год}$$

Кількість тепла втрачається колоною в навколишнє середовище, приймаємо вихідні дані для колони дистиляції: $t_{ср}$ = 88,6 ºС; λ_2 – 0,1769 Вт/(м · К):

$$Q_5 = 49776 \text{ кДж/год}$$

Втрати тепла, що втрачається кубом-випарником, приймаємо такі ж як і для куба-випарника колони дистиляції:

$$Q_6 = 19857 \text{ кДж/год}$$

Всього втрачаємо тепла в навколишнє середовище:

$$Q_5 + Q_6 = 49776 + 19857 = 69633 \text{ кДж/год}$$

Загальний витрата тепла становить:

$$Q_{витрат} = 1139451 + 2407 + 69633 = 1211521 \text{ кДж/год}$$

Необхідно підвести тепла за рахунок нагрівання кубової рідини:

$$Q = 1211521 – 499293 = 712228 \text{ кДж/год}$$

Визначаємо електричну потужність, споживану кубом, приймаючи коефіцієнт запасу потужності до – 1,2, по формулі (2.54):

$$P = 712228 \cdot 1,2 / 3600 = 240 \text{ кВт}$$

Визначаємо довжину ніхромового стрічки з аналогічними даними для розрахунку, як і для куба-випарника колони дистиляції за формулою (2.58):

$$l = 3802 \cdot 40/240 \cdot 1,433 = 16794 \text{ см, або } l = 167,94 \text{ м}$$

Відстань між верхнім і нижнім власниками спіралі 0,4 м, діаметр спіралі 0,15 м. знаходимо необхідну кількість витків спіралі за формулою (2.57):

$$n = 167/(3,14 \cdot 0,15) = 355$$

Відстань між витками встановлюємо з виразу (2.58):

$$l_в = 40 \cdot 36/355 = 4,05 \text{ м}$$

Кубові залишки колон дистиляції та ректифікації містять 87% $TiCl_4$, після їх переробки в печах випарювання пульпи (ПВП), тетрахлорид титану отриманий від виварки і сконденсований, зливається в ємності (танки), що надходить з ділянки хлорування. Кількість кубових залишків з трьох кубів-випарників:

$$82 + 25 + 25 = 132 \text{ кг/год}$$

Кількість кубового залишку з куба-випарника колони дистиляції може змінюватися в залежності від ступеня очищення і відповідно внесеного в куб випарник розчину бітуму. При максимальному забрудненні ТТТ ванадієм, коли його вміст у продукті досягає 0,1%, і як наслідок максимальне збільшення

дозування розчину (до 115 кг/год чистого бітуму), кількість кубового залишку колони дистиляції доходить до 120 кг/год, Тоді максимальна кількість виведених кубових буде дорівнює:

$$120 + 25 + 25 = 170 \text{ кг/год}$$

з них: $TiCl_4$ - 147,9 кг; кількість сухого залишку – 22,1 кг з урахуванням непрореагировавщего бітуму.

Кожен куб-випарник крім максимальної потужності, може працювати на ⅙ ;⅓; ½ від загальної потужності, в залежності від виробничої необхідності і технологічного процесу проводиться на колонах. Кількість подаваної флегми регулюється на колонах дистиляції і другий ректифікації. Процес ректифікаційної очищення регулюють таким чином, щоб витрата ТТТ становив 1,2 тонни на 1 тонну очищеного тетрахлориду титану (ОТТ) [3].

На одну тонну ОТТ витрачається електроенергії:

кубом-випарником колони дистиляції: 475/4,118 = 115,3 кВт;

кубом-випарником першої колони ректифікації: 175/3,832 = 45,6 кВт;

кубом-випарником другий ректифікації: 240/3,807 = 63,0 кВт

Разом:

$$115,3 + 45,6 + 63,0 = 223,9 \text{ кВт}$$

Виходячи з розрахункових даних витрата ТТТ на одну тонну становить:

$$4,200/3,807 = 1,103$$

Допоміжне обладнання в цеху ректифікації необхідно: для нормальної і безперервної роботи основного устаткування; для забезпечення чіткої роботи цеху по всьому виробничому ланцюжку підприємства; для переробки своїх технологічних відходів і перетворення їх у товарну продукцію.

Керуючись виробничими розрахунками; апаратурно-технологічної схеми й специфікою технологічного процесу, нам необхідно забезпечити цех

ректифікації складом готової продукції (ОТТ); насосами перекачувань; напірними і накопичувальними баками; відстійниками і ПВП; холодильниками і конденсаторами, ємностями для приготування розчину бітуму і для збору і зберігання ОТТ і ТТТ.

Цех ректифікації являє собою семиповерхова будівля з природним і штучним освітленням та системою природної припливно-витяжної вентиляції на кожному поверсі. Основне і допоміжне обладнання (крім ємностей складу ОТТ, відбору і зберігання ОТТ і ТТТ), розташоване на ділянці поповерхово в залежності від призначення. Так само безпосередньо в будівлі ділянки розташовуються: обладнання КіА, розподільні електроустановки і трансформатори, електро- та механічні майстерні, кімната змінних майстрів з диспетчерським пультом поверховій зв'язку з технологічним персоналом, сан. вузол, приміщення для прийому їжі. Ємності (танки) для складу ОТТ і відбору і зберігання ОТТ і ТТТ розташовуються в безпосередній близькості від ділянки. Так само до ділянки підведені автомобільні і залізничні дороги, оснащені майданчиками для вивантаження допоміжного сировини та завантаження продукції.

Все основне і допоміжне обладнання маркируем згідно апаратурно-технологічній схемі і призначенням буквено-цифровими позначеннями.

Складаємо таблицю основного і допоміжного обладнання цеху (таблиця 2.6). Згідно листа розташування приймаємо такі позначення:

0 – територія в безпосередній близькості від ділянки

1 – I-й поверх, позначка 0,000 м;

2 – II-й поверх, позначка 4,800 м;

3 – III-й поверх, позначка 9,600 м;

4 – IV-й поверх, позначка 14, 400 м;

5 – V-й поверх, позначка 19,200 м;

6 – VI-й поверх, позначка 24,000 м;

7 – VII-й поверх, позначка 29,400 м.

Таблиця 2.6 – Основне і допоміжне обладнання цеха ректифікації

№ розташування	Найменування та позначення обладнання	Призначення обладнання	Технічна характеристика обладнання	Кіль-кість
1	2	3	4	5
0	Танки : Т 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	Для зберігання ОТТ (склад ОТТ)	Діаметр D = 3000 мм, довжина l = 14040 мм; об'єм V = 100 м3; Робочий тиск Р до 0,7 Па. Матеріал сталь 12Х18Н10 Т, товщина стінки 12 мм Оснащений покажчиком рівня, запобіжним клапаном. Підключений до ліній для накопичення, слива, переливу ОТТ. Вільний простір заповнений аргоном.	8
	Т 1, 2, 3, 4, 5, 6	Для збору і зберігання ОТТ (Т 1, 2, 3); для прийому і зберігання ТТТ (Т 4, 5, 6)	D = 3000 мм; l = 9000 мм; V = 68 м3; товщина стінки 15 мм, робочий тиск Р = 0,7 Па. Матеріал сталь 12Х18Н10Т забезпечена лінією аргону для заповнення вільного від рідини простору; лініями наповнення, зливу продукту. Обладнаний радарним рівнеміром.	6
	Насос Цг 50/50 Н 1 – 1,2	Для перекачування ОТТ, в танки Т 1, 2, 3 і суміжні цеху	Продуктивність: 50 м3/год, напір 50м водного стовпа, двигун N = 18 кВт; частота обертання 3000 хв $^{-1}$.Тип - зовнішній	2

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5
1	НП	Насос підлоги, для відкачування води після миття цеху на ділянку знешкодження кислих стоків	Продуктивність 30 $м^2$/год; напір 50 м водного стовпа, двигун N = 20 кВт; частота обертання 2000 $хв^{-1}$.	1
	Н1-3,4 (насос ЦГ 50/50)	Для перекачування ОТТ з танків Т1, 2,3 на склад ОТТ і суміжні цеху	Продуктивність: 50 м3/год, напір 50 м водного стовпа, двигун N=18 кВт, чистота обертання 3000 $хв^{-1}$. Тип – зовнішній.	2
	Н1-4,5 (насос ЦГ 50/50)	Для перекачування ОТТ в цистерни для відправки стороннім споживачам		2
	Н2-1,2 (насос ЦГ 50/50)	Для закачування ТТТ з танків Т4, 5, 6 в напірні баки		2
	Насос НП 30/50 Н3-1	Для перекачування кубових залишків колон першої та другої ректифікації в баки відстійники	Продуктивність 30 $м^3$/год, напір 80 м водного стовпа двигун N=25 кВт, чистота обертання 3000 $хв^{-1}$. Тип – погружной. Бак насоса D = 1100 мм, Н = 900 мм, товщина стінки 6 мм, матеріал сталь 12Х18Н10Т	1

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5
1	Н4-1,2	Для створення розрядження і відкачування парів $TiCl_4$ через холодильники з реторт ПВП 1, 2	Продуктивність 100 $м^3$/год, напір 80 м водного стовпа двигун N=25 кВт, чистота обертання 3000 $хв^{-1}$. Тип – зовнішній.	2
	Н5-1,2	Для перекачування $TiCl_4$ з баків насосів Н4-1,2, по лінії переливу, в танки Т 4, 5, 6.		2
	Насос ЦГ 100/80 НВ 1,2	Для підкачки технічної води в цех з загальнозаводської системи і підтримки нормального тиску.		2
	Бак - накопичувач Б2-З	Для зливу кубового залишку колон першої та другої ректифікації, забезпечує через себе висновок дихальної системи обладнання ділянки.	Бак циліндричний, зварний, з конусним днищем, D=2000мм, H=3800мм, V=4$м^3$, матеріал сталь 12Х18Н10Т. Оснащений вхідними дихальними лініями з обладнання ділянки і основною вихідною лінією з холодильником типу "труба в трубі", що йде на газо знешкоджену станцію. В сорочку холодильника подається для охолодження газів технічна вода.	1

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5
	Колони дистиляції до 1 – 1,2	Для очищення ТТТ від оксохлоридов ванадію і титану, гексохлорбензолу (C_6Cl_6)	Н = 15410 мм, Р = 600 мм. В колоні 10 сітчастих тарілок з переливом та три шари насадок кілець ″Рашиг25х25 мм з нержавіючої сталі. Відстань між насадками 700 мм, між тарілками 500 мм. Колона теплоізольована асбозуритом. Товщина стінки колони 5 мм, тарілки 4 мм. Корпус колони .з 8-ми царг. Матеріал сталь 12Х18Н10Т	2
2	Колона першої ректифікації, До 2 – 1,2	Для очищення тетрахлориду титану від $SiCl_4$ і летких газоподібних, низькокиплячих домішок.	Н = 15410; D = 600 мм; кількість тарілок – 39 шт., відстань між тарілками 300 мм. Корпус колони з 8-ми царг, матеріал сталь 12Х18Н10Т.	2
	Колони другий ректифікації, До 3 – 1,2	Для глибокого очищення тетрахлориду титану від висококиплячих домішок: оксихлорид алюмінію (AlOCl), гексохлорбензолу (C_6Cl_6), надлишкового хлористого алюмінію ($AlCl_3$).	Н = 15410; D = 600 мм; відстань між тарілками 600 мм, кількість – 14 шт. Матеріал сталь 12Х18Н10Т.	2

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5
2	Куби-випарники	Для нагрівання випаровування тетрахлориду титану	H = 1900; D = 2500 мм; товщина стінки 8 мм, матеріал сталь 12Х18Н10Т. Кількість нагрівачів 6 шт., потужність: До 1 – 1,2 500 кВт; До 2 – 1,2 180 кВт; До 3 – 1,2 295 кВт	6
	Піч випарювання пульпи ПВП 1,2	Для випарювання кубових залишків	Реторта: H = 4000; D = 2400; V = 12 м3, товщина стінки 20 мм, Матеріал сталь 12Х18Н10Т. Потужність печі 300 кВт.	2
	Бак Б 3 – 1, Б 3 – 2, Б 3 – 3	Для складання відстоювання кубового залишку І-й і ІІ-й ректифікації, Б 3 – 3 аварійних зливів напірних і накопичувальних баків верхніх відміток.	Циліндричний, зварний, з конусним днищем, H = 2200 мм; D = 2000 мм; V = 6 м3, матеріал сталь 12Х18Н10Т, оснащений візуальним рівнеміром з ціною поділки 1 см – 106 кг, підключений до загальної дихальній системі.	3
	Холодильник Х – 1,2	Для охолодження конденсату з ПВП	Тип труба в трубі; L = 5000 м; H = 2115 мм; ширина = 1345 мм. Охолоджувач – технічна вода. Матеріал сталь 12Х18Н10Т.	2

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5
3	Бак Б 4 – 1,2	Для приготування розчину з ОТТ	H = 1600 мм; D = 2000 мм; V = 4,88 м^3.	2
4	Бак Б 1 – 1,2	Для створення напору при витраті ТТТ на процес в кубі колон До 1 – 1,2 і на приготування суспензії	H = 2330 м; D = 2000 мм; V = 6 м3. Матеріал сталь 12Х18Н10Т. Ціна поділки візуального рівнеміра: 1 см – 53 кг	2
5	Бак Б 2 – 1, Б 2 – 2, Б 2 – 4	Для збору дистиляту колон: До 1 – 1,2 (Б 2 – 1) До 2 – 1,2 (Б 2 – 2) До 3 – 1,2 (Б 2 – 4)	Бак Б 2 – 4 оснащений лінією зливу на танки збору ОТТ і лінією завантаження баків приготування розчину Б 4 – 1,2	2

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

3.1 Техніка безпеки цеху ректифікації тетрахлориду титану

3.1.1 Основні шкідливості і небезпеки цеху ректифікації

Цех ректифікації призначений для:

- очищення технічного тетрахлориду титану (ТТТ), що надходить з ділянки хлорування, від домішок і передачі очищеного тетрахлориду титану (ОТТ) в суміжний цех і стороннім споживачам;
- випарювання вуглецево-ванадиевого кубового залишку колон дистиляції та ректифікації;
- переробки кубових залишків колон дистиляції та ректифікації;
- приготування суспензії, що складається з ТТТ і кам'яновугільного пеку.

Практично все основне устаткування в цеху повністю автоматизовано, ручна праця застосовується тільки при ремонтних роботах. Широка автоматизація цеха обумовлена дуже небезпечним продуктом, який на ньому переробляється.

Всі технологічні процеси в цеху пов'язані з використанням і утворенням шкідливих для здоров'я людини твердих, рідких і газоподібних речовин, таких як: тетрахлорид титану тетрахлорид кремнію, фосген, хлористий водень, соляна кислота, хлориди металів.

Тетрахлорид титану ($TiCl_4$) і тетрахлорид кремнію ($SiCl_4$) – жовтуваті або безбарвні рідини з різким неприємним запахом, при взаємодії з вологою повітря ″димлять″ з утворенням білих парів хлористого водню [5].

При отруєнні дані речовини уражають органи дихання, при попаданні на шкіру та слизові оболонки викликають хімічні опіки. Гранично допустима концентрація $TiCl_4$ і $SiCl_4$ (у перерахунку на HCl) в повітрі виробничих приміщень становить 5,0 мг/м^3.

Соляна кислота (HCl) – безбарвна або жовтувата рідина, що димить на повітрі із-за виділення парів хлористого водню. Пари HCl подразнюють слизову оболонку верхніх дихальних шляхів і очей. Попадання соляної кислоти на шкіру і в очі призводить до хімічних опіків. Тривалий вплив парів HCl може викликати ураження органів дихання і помутніння рогівки очей. Гранично допустима концентрація у повітрі робочої зони – 5,0 мг/м^3.

Живлення електроустаткування цеху ректифікації здійснюють від робочої напруги 380 В. Порушення правил експлуатації електрообладнання може призвести до ураження електрострумом. Все електроустаткування (електродвигуни, куби-випарники, печі, мішалки, пускові кнопки, рубильники ГПМ) мають видиме заземлення. Освітлення робочих місць здійснюється з допомогою світильників. Переносні електросвітильники живиться лише від напруги 12 вольт [9].

Таблиця 3.1 – Порогові значення електричного струму

Граничне значення, мА	Вплив на людину	
	Змінний струм	Постійний струм
0,5 – 1,5	Легке тремтіння пальців рук	Не відчувається
2,0 – 3,0	Сильне тремтіння пальців рук, відчуття доходять до зап'ястя	Не відчувається
5,0 – 7,0	Легкі судоми, больові відчуття в руках	Свербіж, відчувається нагрів

Механічні травми можуть бути отримані при порушенні правил експлуатації электроподъемных і транспортних засобів (кран-балки, навантажувачі, автомашини), вентиляторів, насосів, мішалок, використання несправного інструменту, монтажних роботах.

В цехе багато апарати і установки нагріваються до високої температури (куби-випарники, печі випарювання кубових залишків і т. д.). Недотримання правил охорони праці при роботі з вказаними апаратами може призвести до опіку. Неправильне ведення електрозварювальних робіт може призвести до

ураження очей електричною дугою або до опіків від бризок розплавленого металу.

Пил ванадийсодержащих пеку (суміш адсорбентів і непрореагировавшего вуглеводню відновника) з ПВП подразнює дихальні шляхи, слизову оболонку очей, викликає хвороба легенів - ″силікоз.″

3.1.2 Заходи щодо усунення шкідливостей і небезпек

Інженерні заходи.

Для зниження шкідливого впливу тепловиділень цех обладнаний аераційними ліхтарями, вбудованими щитами і відкриваються фрамугами. Вентиляція приміщдння розрахована на зменшення тепловиділень і здійснюється за допомогою аерації.

У жаркий час року шкідливий вплив теплоизлучений слід знизити за допомогою вентиляційних установок, у холодну пору - знижувати вплив ізоляцією цеху від зовнішнього середовища воротами з повітряними тепловими завісами. Крім того цех ректифікації обладнаний припливною вентиляцією для подачі теплого повітря від повітряних конденсаторів-дефлегматоров в зимовий час. У уникнення опіків обладнання з температурою понад 45 ^{0}С забезпечується теплоізоляцією.

Для зниження запиленості та загазованості передбачені вентиляційні відсоси, аспіраційні парасольки над кришкою печі випарювання пульпи.

Для зниження ймовірності впливу на людину тетрахлориду титану при аварійних ситуаціях, всі працівники цеха повинні знаходитися в цехе в спецодязі, яка складається з костюма сукняного, каски і рукавичок з кислостійким покриттям, взуття з натуральної шкіри з стійкої підошвою. Так само у кожного працівника і службовця, який перебуває в цехе, повинен бути при собі протигаз з фільтром марки БКФ. На кожному поверсі цеху розташований стаціонарний фонтан з питною водою, для промивання обличчя та інших частин тіла при попаданні тетрахлориду титану.

Все електрообладнання цеха огороджено, силові кабелі, що проходять по стінах будівлі - ізольовані, і знаходяться на висоті, що виключає можливого непередбаченого дотику. Силове електрообладнання, що знаходиться в спеціальних приміщеннях, недоступних для сторонніх. Ремонтом та обслуговуванням електрообладнання займається тільки электрослужба цеха.

Для захисту від механічних ушкоджень, цехе ректифікації всі обертові частини насосів, мішалок та інше обладнання, захищені спеціальними захисними кожухами. Також захищені кожухами (стоять на з'єднувальних фланцях) лінії працюють під тиском (лінії закачування і перекачування насосами тетрахлориду титану). Всі сходи в цехе обладнані поручнями, навколо приямків і отворів знаходяться огорожа і попереджувальні знаки, також забезпечені огородженнями транспортні та ремонтні майданчики (переносні та стаціонарні), висота яких перевищує 1,2 м.

При роботі на вантажопідіймальних механізмах, в місцях можливого проходу людей або при проїзді автотранспорту, включаються світлові покажчики ″працює кранВсі вантажопідйомне обладнання .″цеха забезпечене ключ-бирочной системою, для недопущення до роботи сторонніх осіб на вантажопідіймальних механізмах.

В місцях перетину пішохідних шляхів на ділянці з дорогами, призначеними для проїзду автотранспорту, як для пішоходів, так і для транспорту встановлені попереджувальні знаки. При в'їзді транспорту на ділянку встановлюється знак обмеження швидкості руху по цеху.

У зв'язку зі специфікою виробництва, а також для забезпечення безпечного проведення технологічного процесу, для працівників цеха необхідно створити комплекс нормативних документів і інструкцій, а також жорсткий графік перевірки знань з ним.

3.1.3 Електрообладнання

Приміщення цеху ректифікації відноситься до класу Д-Іа, так як при нормальній роботі не утворюється вибухонебезпечної суміші. При монтажі і

ремонті електрообладнання необхідно дотримуватися правила установки електроустаткування. Всі електроустановки, електродвигуни, електропускові апарати повинні бути виконаними у вибухозахисному варіанті. Електричні світильники можуть застосовуватись у разі коли рівень їх вибухозахищених властивостей відповідає класу Д-Іа. Для приміщення класу Д-Іа допускаються масляні пускачі підвищеної надійності проти вибуху ПМ-700. Допускається прокладання проводів усередині приміщень по стінах. Застосовуються кабелю ВГР.

3.2 Виробнича санітарія в цеху ректифікації

Цех ректифікації відноситься до VIII розряду зорових робіт. Норма штучного освітлення повинна бути 50 лк, так як в цеху організовано періодичне спостереження за ходом процесу виробництва при постійному перебуванні людей у приміщенні. Коефіцієнт освітлення дорівнює 0,58. Природне освітлення в світлий час доби здійснюється через бічні отвори. Штучне освітлення виконується ртутними лампами ДРП-1000[13].

При виконанні поточного ремонту виникає необхідність додаткового висвітлення. Для цього передбачено використання переносних світильників СПВ-27. Крім цього передбачено аварійне освітлення світильниками ИНБН -150 у виконанні 35.

У разі раптового відключення робочого освітлення на робочих місцях, включається аварійне. Воно повинно бути не нижче 5% нормативного, але не менше 2 лк усередині будівлі.

3.2.1 Вентиляція

Метеоумови в цеху повинні бути наступними: швидкість руху повітря 0,2...0,4 м/с, відносна вологість 60...75%, категорія робіт - 3 (важка).

В цеху передбачена аерація, поєднана з механічною вентиляцією. Повітрообмін здійснюється через аераційно-світлові ліхтарі і віконні прорізи.

Надходження зовнішнього повітря здійснюється через стулки вікон, а видалення забрудненого повітря - через стулки в ліхтарі. При недостатній аерації для видалення утворилися пилу і газів в процесі виробництва застосовується місцева витяжна вентиляція. Система складається з вентиляторів і аераційних установок. Кратність повітрообміну в цеху ректифікації становить 3. Для поліпшення умов праці в літній час застосовуються фугирующие вентиляційні установки[15].

3.2.2 Побутові і допоміжні приміщення

По санітарній характеристиці цех ректифікації відносять до IIб групі виробництва.

В склад побутових приміщень входять:

- гардеробні (чоловічі та жіночі), 2-а приміщення;
- душові (чоловічі та жіночі), 4-е приміщення із загальною кількістю 25 місць (5,6 осіб на 1 сітку);
- умивальники (чоловічі та жіночі), 10 одиниць;
- вбиральні (чоловічі та жіночі);
- кімнати для відпочинку, 2-а приміщення площею 10 м2;
- їдальня, 100 м від будівлі цеху;
- буфет, там же, де і їдальня;
- здоровпункт, 200 м від будівлі цеху

3.2.3 Індивідуальні засоби захисту

Для захисту працюючих в цеху ректифікації передбачені наступні засоби:

- суконна куртка і штани - захист шкіри від пилу і шкідливих речовин;
- захисні окуляри;
- рукавички з антикислотным напиленням, захист від опіків;
- каска ″Працю″ з підшоломником - захист голови;
- респіратор, протигаз з фільтром, БКФ захист органів дихання;
- гумові чоботи і черевики шкіряні з кислотостійкої підошвою;
- основні засоби захисту – ізолюючі.

3.3 Протипожежна безпека в цеху ректифікації

3.3.1 Характеристика цеху з вибухопожежної безпеки

Цех ректифікації призначений для очищення ТТТ від домішок і передачі очищеного продукту (ОТТ) споживачу.

У процесі переробки й очищення ТТТ утворюється пульпа, яка випаровується в печах випарювання пульпи для довтетрахлориду титану. При митті обладнання, газоходів утворюються кислі стоки, які перекачуються насосами на станцію нейтралізації. Сировина, що застосовується в технологічних ланцюжках цеха ректифікації, проміжні та кінцеві готові продукти, технологічні відходи, не горючі, не пожежонебезпечні і не вибухонебезпечні.

Утворюються в цехе ректифікації в ході технологічних процесів гази перед їх викидом в димові труби проходять очищення від хлору та хлоровмісних продуктів водою або 10% вапняним молоком у скруберах технологічної газоочистки.

Конструкція будівель та виробничих приміщень виконана з матеріалів, що відносяться до категорії негорючих. Категорія приміщень згідно з ОНТП 24-86 і ПУЕ в цехе ректифікації - Д (норма). Будівля цеха оснащене стаціонарної зовнішньої сходами (пожежної).

3.3.2 Профілактичні протипожежні заходи

а) Інженерні заходи:

- приміщення цеху будуються з негорючих матеріалів I ступеня вогнестійкості;
- контрольно-вимірювальні прилади і блокування знаходиться на обладнанні;
- встановлені датчики для найбільш раннього виявлення пожежі, що почалася;

- відповідно до молнієзахистуцех відноситься до III ступеня захисту, так як клас Д –Іа вимагає захисту від прямого удару блискавки, електричної індукції і запасу високих електропотенціалів через надземні і підземні комунікації.

б) Організаційні заходи:

- передбачена організація пожежної дружини та пожежно-технічної комісії;
- проведення протипожежного інструктажу та занять з пожежно-технічного мінімуму;
- встановлення суворого пожежного режиму;
- прибирання робочих місць;
- забезпечення справного утримання та постійну готовність до дії засобів пожежогасіння, зв'язку і сигналізації.

3.3.3 Засоби гасіння пожеж

В цехе згідно з нормами ОНТП 24-86 є наступні первинні засоби пожежегасіння:

- в електроустановках – вогнегасники вуглекислотні ОУ-2, ОУ-5 та ОУ-8, ящики з сухим піском;
- в інших приміщеннях цеху – вуглекислотні і порошкові вогнегасники;
- пожежні крани укомплектовані рукавами і стовбурами для передачі води на гасіння пожежі;
- пожежні щити укомплектовані відрами, лопатами, баграми, ломами, вогнегасниками ОП-10, ящиками з сухим піском;
- в кабельному тунелі змонтована станція виявлення пожежі. Крім того тунель обладнаний трубопроводом для об'ємного гасіння пожежі паром.

Застосування відкритого вогню заборонено на всій території цеху, у виробничих і побутових приміщеннях, крім передбачених технологічно [13].

3.4 Визначення повітрообміну в цеху ректифікації в літній та перехідний періоди

Технологічний процес в цеху ректифікації супроводжується виділенням попелу та вологи $W_{ізб}$ = 122,5 кг/год. надлишок тепла в літній період (включаючи радіацію) складають 129840 Дж/ч. Питомий виділення явного тепла q > 20 Дж/м^3·год.

Витрата повітря на місцеві відсмоктувачі $G_{м. про}$ = 5780 м3/год. У літній період застосовується природний повітрообмін. Повітрообмін здійснюється за схемою ″знизу - вгору″. Робота в цеху ″легка″.

3.4.1 Визначення повітрообміну в літній період

Параметри зовнішнього повітря $t_н$ = 22^{0}С; $\varphi_н$ = 50%; $I_н$ = 10,3 Дж/кг; $d_н$ = 8,4 г/кг (точка А на рисунку 3.1)

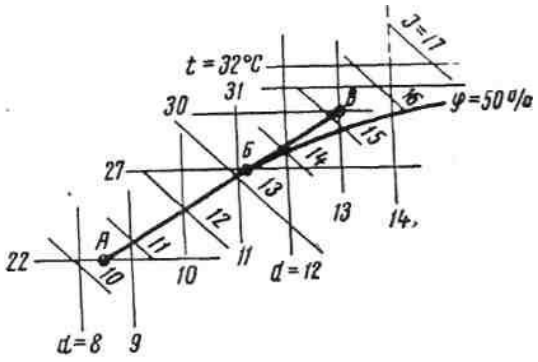


Рисунок 5.1 - Визначення повітрообміну в літній період

Приплив і витяжка здійснюється за рахунок аерації. Кутовий коефіцієнт процесу асиміляції тепла і вологи:

$$\xi = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{129840}{122500} = 1{,}06 \qquad (3.1)$$

Лінія процесу АВ зображена на рисунку 5.1. Так як щогодини видаляється з робочої зони місцевими відсмоктувачами $G_{м.\ про} = 5780$ кг/год повітря, то при розрахунку необхідно врахувати тепло і вологу, які асимілюються в робочій зоні припливним повітрям $G'_{пр}$ подається для відшкодування $G_{м.\ про}$ зважаючи на те, що процес асиміляції відбувається в робочій зоні, m = 0,6.

Вибираємо з лінії процесу точку Б з параметрами повітря в робочій зоні: $t_б = 22 + 5 = 27^0$C; $\varphi_б = 50\%$; $I_б = 13,2$ Дж/кг; $d_б = 11,1$ г/кг.

Кількість тепла і вологи, ассимилируемых припливним повітрям, що надходить для відшкодування $G_{м.\ про}$ обчислюють за формулами:

$$Q_м = G_{м.\ про}\left(I_б - I_н\right), \tag{3.2}$$

$$W_м = G_{м.\ про}\left(d_б - d_A\right), \tag{3.3}$$

$$Q_м = 5780 \cdot (13,2 - 10,3) = 16700 \text{ Дж/год},$$
$$W_м = 5780 \cdot (11,1 - 8,4\ ) = 15500 \text{ р/ч} = 15,5 \text{ кг/год}$$

Кількість теплоти і вологи, що підлягають видаленню загальної витяжкою:

$$Q' = Q_{хат} - Q_м\ , \tag{3.4}$$

$$W' = W_{хат} - W_м\ , \tag{3.5}$$

$$Q' = 129840 - 16700 = 113140 \text{ Дж/год},$$
$$W' = 122,5 - 15,5 = 107 \text{ кг/год}$$

Витрата припливного повітря для компенсації загальної витяжки:

$$G = \frac{m \cdot Q'}{I_б - I_a}, \tag{3.6}$$

$$G = \frac{0{,}6 \cdot 113140}{13{,}2 - 10{,}3} = 23500 \text{ кг/год}$$

Загальний витрата припливного повітря:

$$G_{пр} = G_{м.\ про} + G, \quad (3.7)$$

$$G_{пр} = 23500 + 5780 = 29280 \text{ кг/год.}$$

Визначаємо параметри відпрацьованого повітря за формулами:

$$I_к = \frac{I_б - I_а}{m} + I_а \text{ ,} \quad (3.8)$$

$$d_k = \frac{d_б - d_а}{m} + d_а \text{ ,} \quad (3.9)$$

$$I_{до} = \frac{13{,}2 - 10{,}3}{0{,}6} + 10{,}3 = 15{,}1 \text{ Дж/кг,}$$

$$d_k = \frac{11{,}1 - 8{,}4}{0{,}6} + 8{,}4 = 13 \text{ г/кг}$$

Цим параметрам на I-d – діаграмі відповідає точка В ($t_{до}$ = 30 ^{0}C; $\varphi_к$ = 49%).

3.4.2 Визначення повітрообміну в перехідний період

Нехтуючи тепловими втратами і витратою теплоти на нагрів матеріалів в веду їх малої величини, отримаємо теж кількість надлишкової теплоти, що і в літній період. Отже, ε = 1,06. Приймаючи параметри зовнішнього повітря $t_н$ = + 10 ^{0}C; $\varphi_н$ = 70% і відносну вологість повітря в робочій зоні $\varphi_{рз}$ = 70%, отримаємо по I-d – діаграмі (малюнок 5.2): $I_н$ = 5,7; $t_{рз}$ = 22 ^{0}C; $I_{рз}$ = 12,4.

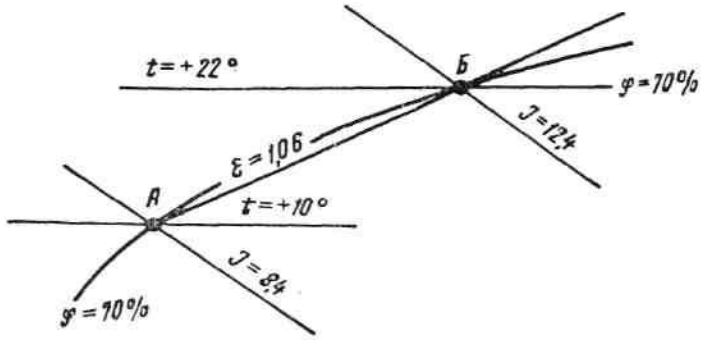


Рисунок 3.2 - Визначення повітрообміну в перехідний період

Кількість тепла, що видаляється місцевими відсмоктувачами:

$$Q_{м.\ про} = G_{м.\ про}\left(I_б - I_н\right) = 5780 \cdot (12{,}4 - 5{,}7) = 38720 \text{ Дж/год}.$$

Теплонадлишки обчислюють за формулою:

$$Q' = Q_{хат} - Q_м = 129840 - 38720 = 91120 \text{ Дж/ч}.$$

Кількість припливного повітря для поглинання теплонадлишків:

$$G_{пр} = \frac{m \cdot Q'}{I_б - I_а} = \frac{0{,}6 \cdot 91120}{12{,}4 - 5{,}7} = 8160 \text{ кг/год} < 19580 \text{ кг/год}$$

У якості розрахункового приймається $G_{пр} = 19580$ кг/год, визначається для холодного періоду року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений матеріальний тепловий розрахунки процесу ректифікаційного очищення технічного тетрахлориду титану продуктивністю 38 тис. тонн в рік.

2. Використання замість алюмінієвої пудри і складного процесу приготування нижчих хлоридів титану (НХТ), в якості реагенту – бітуму 70/30 і найпростішого введення його в процес очищення від ванадію. Це тягне за собою зменшення собівартості очищеного тетрахлориду титану (ОТТ) з-за великої різниці в ціні алюмінієвої пудри і бітуму при їх однаковому кількісному використанні (алюмінієва пудра – 660 грн/кг; бітум 70/30 – 44 грн /кг);

3. При використанні бітуму – відмова від використання хлору, а це тягне за собою не тільки зниження собівартості, але і більш безпечний процес виробництва;

4. Поліпшення умов праці на підприємстві, так як в кеке немає Cl - іона, що тягне за собою відмову від процесу вапнування кеку і подачі в піч азоту для більш спокійного проведення процесу вапнування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

2. Пожуєв В. І., Іващенко В. І., Червоний І. Ф., Грицай В. П. Металургія кольорових металів. Ч.1. Сировинні ресурси і виробництво : підручник / за ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 334 с.

3. Єгоров С. Г., Червоний І. Ф., Воляр Р. М. Конструкції агрегатів кольорової металургії : підручник. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 230 с.

4. Шаповалов В. О., Шейко І. В., Ремізов Г. О. Плазмові процеси та устаткування в металургії : підручник / за ред. акад. Б. Є. Патона. Київ : Хімджест, 2012. 384 с.

5. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. / за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.

6. Нестеренко Т. М., Нестеренко О. М. Дослідження впливу попередньої обробки поверхні стружки титанових сплавів на вибір подальшої технології рециклювання. Інноваційні підходи до розвитку техніки і технологій. В 2 кн. Кн.2 : монографія. Одеса, 2015. С. 76−88.

7. Havlík Tomás. Hydrometallurgy Principles and applications. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2008. 551 p.

8. Lantelme F., Groult H. Molten Salt Chemistry. From Lab to Applications. Elsevier, 2013. 592 p.

9. Nesterenko T. M. Modern state and technologies of titanium alloys production. Innovation in der modernen Wissenschaft : monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 12. Teil 1. Karlsruhe, 2022. S. 5,8−34,165−167.

10. Norgate T. E., Wellwood G. The potential applications for titanium metal powder and their life cycle impacts. Ibid. 2006. V. 58, N 9. P. 58−63.

11. Сучасний стан і прогноз розвитку світової титанової промисловості на період до 2026 року. Повідомлення 4. Феротитан / Колобов Г. О. та ін. Металургія : зб. наук. праць. Запоріжжя, 2020. Вип. 1. С. 5−10.

12. Рабинович О.В. Металургія кольорових металів : навчальний посібник. Дніпро : НМетАУ, Журфонд, 2009. 154 с. — ISBN: 978-966-1696-09-8.

13. Червоний І.Ф. та ін. Металургія рідкісних металів : підручник / Червоний І.Ф., Пітак І.В., Пономаренко О.І., Верховлюк А.М., Іващенко О.В., Шапорев В.П., Іващенко В.І., Пітак О.Я., Пономарьова Н.Г., Шкоп А.О. Харків: Друкарня Мадрид, 2019. 162 с. ISBN: 978-617-7683-50-5.

14. Сігарьов Є.М., Сігарьов М.К., Стороженко С.А. Металургія кольорових металів та сплавів : навчальний посібник. Кам'янське: ДДТУ, 2016. 203 с. ISBN: 978-966-175-144-5.

15. Горбатенко В.П., Горбатенко В.В. Кольорові метали та сплави : підручник. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. 300 с. ISBN: 978-966-377-125-0.

16. Нестеренко Т. М. Про технології переробки відходів виробництва та 15 споживання із кольорових металів. Еко Форум – 2021 : зб. тез доп. V спеціалізов. міжнар. Запорізького еколог. форуму (м. Запоріжжя, 14-16 вер. 2021 р.). Запоріжжя, 2021. С. 288–290. URL: https://ziif.in.ua/wp-content /uploads/2021/09/tezysy-21_sajt.pdf (дата звернення: 21.08.2023).

17. Корнієнко В. О., Нестеренко Т. М. Про рафінування розплавів із низькоякісної вторинної алюмінієвої сировини. Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України : матеріали II Всеукр. науково-практ. конф. за участю молодих науковців (м. Запоріжжя, 18-20 жовт. 2022 р.). Запоріжжя : ЗНУ, 2022. С. 219−220. URL: https://www.znu.edu.ua/ii_znu/nauka/conf2/znirbyk_22.pdf (дата звернення: 21.08.2023).

18.°Лотошников О. О., Нестеренко Т. М. Технологічні особливості згущення червоних шламів із використанням флокулянтів. Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України : тези доп. І міжнар. наук.-

практ. онлайн-конф. (м. Київ, 15 бер. 2021 р.). Київ, 2021. С. 689−691. URL : https://itta.org.ua/onlajn-konferenciya-15-03-2021/ (дата звернення: 21.08.2023).

19. Артеменко Я. С., Комок О. О., Нестеренко Т. М. Переробка алюмінієвого та титанового брухту для вилучення кольорових металів. Молода наука-2023 : зб. наук. праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених, Запоріжжя, 17-22 квіт. 2023 р. Запоріжжя: ЗНУ, 2023. Т.5. С.13−15. URL: https://sites.znu.edu.ua/stud-sci-soc//2023/tom_5_2023_r__k_.pdf (дата звернення: 21.08.2023).