

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра кріогенної техніки



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи

На тему: «Розробка установки вилучення тритію з уповільнювача ядерного реактора методом низькотемпературної ректифікації»

Здобувача Матвєєв Р.В.
(прізвище, ініціали)

4 курсу ЕН-142 групи

Керівник доц. Грудка Б.Г.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: проф. Морозюк Л.І.
(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2026 р., протокол № _____

Завідувач кафедри КТ _____ **Юрій СИМОНЕНКО**

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ, КРІОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЕНЕРГЕТИКИ ІМ. В.С. МАРТИНОВСЬКОГО

Кафедра	Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти	Бакалавр
Спеціальність	142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма	Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ

д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«__» ____ 2026 року

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

Матвєєва Руслана Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка установки вилучення тритію з уповільнювача ядерного реактора методом низькотемпературної ректифікації

керівник роботи к.т.н., доц. Грудка Богдан Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 31 жовтня 2025 року № 613-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 01 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: Установка ізотопного очищення, концентрація тритію в продукційному потоці 99,9%, витрата важкої води на вході 20000 моль/год, витрата тритію в очищеній воді 0,02755 моль/год, концентрація тритію у вихідному потоці $6 \cdot 10^{-3}\%$.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

Вступ. Теоретична частина. Ізотопи водню. Протій. Дейтерій. Тритій. Влаштування ядерних реакторів. Огляд установок ізотопного очищення. Опис та технологічні розрахунки проекрованої установки ізотопного очищення. Розрахунок основних параметрів роботи комплексу АЕС. Розрахунок параметрів роботи технологічних вузлів УЮ. Розрахунок процесу ректифікації колон. Проектно-конструкторська частина. Проектування та розрахунок колони. Конструктивний розрахунок каркасу колони. Розрахунок теплообмінників та ізоляції колони. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Презентація Power Point (15 слайдів)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Проф. Морозюк Л.І.		

7. Дата видачі завдання 01.12.2025

Керівник _____ доц. Грудка Б.Г.
Завдання прийняв до виконання _____ Матвеев Р.В.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і аналіз літератури	30 днів	
3	Розробка математичної моделі об'єкта	10 днів	
4	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	15 днів	
5	Теплові і конструктивні розрахунки елементів об'єкта	10 днів	
6	Розробка креслень і графічних моделей	20 днів	
7	Аналіз результатів досліджень	8 днів	
8	Оформлення пояснювальної записки	5 днів	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	5 днів	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	5 днів	

Здобувач-дипломник _____ Матвеев Р.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Грудка Б.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчинності

Здобувач-дипломник _____ Матвеев Р.В.
(ПІБ) (підпис)

АНОТАЦІЯ

Проведено детальний аналіз світового досвіду детритизації та відомих патентних рішень (зокрема комбінацій процесів CECE, LPCE, BHW та низькотемпературної ректифікації). Обґрунтовано оптимальність комплексних схем для глибокого вилучення тритію. Розраховано параметри ключових технологічних точок схеми розділення із загальною продуктивністю за вихідною сумішшю. Визначено витрати дистилату та кубових залишків для розділення суміші D_2+T_2 з отриманням товарного концентрату тритію із заданим ступенем чистоти. Проведено гідравлічний розрахунок насадкових ректифікаційних колон. Визначено оптимальні робочі швидкості пари, які лежать нижче межі захлинування апарата (точки інверсії фаз), що гарантує стабільність процесу при коливаннях зовнішніх навантажень. Розраховано геометричні розміри колон (діаметр, висота насадкової частини) та їхній гідравлічний опір. Розраховано теплові навантаження на конденсатори та випарники кріогенних колон. Спроектовано систему захисту від теплоприпливів навколишнього середовища: розраховано екранно-вакуумну ізоляцію товщиною 30 мм із оптимальною густиною намотки (7 екранів зі склополотна ЕВТІ-15 та алюмінієвої фольги на 1 см). Сумарний теплоприплив до робочих колон зведений до технологічно мінімального рівня. Розглянуто методи безпечного тривалого зберігання вилученого тритію. Доведена перевага фіксації радіонукліда у твердій фазі у вигляді гідриду (тритиду) титану, що повністю виключає неконтрольоване зростання тиску через радіоліз (на відміну від зберігання в рідкій або газоподібній формі).

Ключові слова: дейтерій, тритій, ізотопи, ректифікація, ядерний реактор

ABSTRACT

A detailed analysis of the world experience of detritization and known patent solutions (in particular, combinations of the CECE, LPCE, BHW processes and low-temperature rectification) was conducted. The optimality of complex schemes for deep tritium extraction was substantiated. The parameters of key technological points of the separation scheme with the total productivity by the initial mixture were calculated. The consumption of distillate and bottoms residues for the separation of the D₂+T₂ mixture with the production of a commercial tritium concentrate with a given degree of purity was determined. A hydraulic calculation of packed rectification columns was performed. The optimal operating steam velocities that lie below the choke limit of the apparatus (phase inversion points) were determined, which guarantees the stability of the process during fluctuations in external loads. The geometric dimensions of the columns (diameter, height of the packed part) and their hydraulic resistance were calculated. The thermal loads on the condensers and evaporators of cryogenic columns were calculated. A system of protection against environmental heat fluxes has been designed: a shield-vacuum insulation with a thickness of 30 mm has been calculated with an optimal winding density (7 screens of EVTI-15 fiberglass and aluminum foil per 1 cm). The total heat flux to the working columns has been reduced to a technologically minimal level. Methods for safe long-term storage of extracted tritium have been considered. The advantage of fixing the radionuclide in the solid phase in the form of titanium hydride (tritide) has been proven, which completely eliminates uncontrolled pressure increase due to radiolysis (unlike storage in liquid or gaseous form).

Keywords: deuterium, tritium, isotopes, rectification, nuclear reactor

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	8
1.1. Ізотопи водню.....	8
1.1.1. Протій. Легкий водень	9
1.1.2. Дейтерій. Важкий водень.....	9
1.1.3. Тритій. Надважкий водень.....	10
1.2. Атомна енергетика	15
1.2.1. Огляд ядерної промисловості.....	15
1.2.2. Устрій ядерних реакторів.....	20
1.2.3. Важководний ядерний реактор CANDU – 600.....	24
1.3. Установки ізотопного очищення.....	28
1.3.1. Методи розділення ізотопів.....	28
1.3.2. Огляд установок ізотопного очищення.....	36
2. ОПИС ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЕКТОВАНОЇ УСТАНОВКИ ІЗОТОПНОГО ОЧИЩЕННЯ.....	44
2.1. Опис принципу роботи установки	44
2.2. Розрахунок основних параметрів роботи всього комплексу АЕС	49
2.3. Розрахунок параметрів роботи технологічних вузлів УІО	53
2.4. Розрахунок процесу ректифікації колон.....	59
3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	70
3.1. Проектування та розрахунок ректифікаційної колони	70
3.2. Гідравлічний розрахунок колони	74
3.3. Конструктивний розрахунок каркасу колони	79
3.4. Розрахунок допоміжних пристроїв колони.....	83
3.5. Розрахунок теплообмінників колони.....	84
3.6. Розрахунок ізоляції	88
ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	93

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11				
Змін.	Аркуш	№ документ.	Підпис	Дата					
Розроб.		Матвєєв Р.В.			Розробка установки вилучення тритію з уповільнювача ядерного реактора методом низькотемпературної	Літ.	Аркуш	Листів	
Перевір.		Грудка Б.Г.							
Рецензуванн						ЕН-142			
Н. Контр.		Грудка Б.Г.							
Затверджен									

ВСТУП

Потреби суспільства в енергетичних ресурсах постійно зростають. Водночас запаси невідновлюваних ресурсів, завдяки яким отримується більша частина енергії, далеко не безмежні. У цьому контексті найближчим часом контрольований термоядерний синтез може стати основою світової енергетики.

Важкі ізотопи водню — дейтерій і тритій — є найважливішими компонентами термоядерного палива. У той час як дейтерій на Землі міститься у величезних кількостях у морській воді, тритій у природній формі на планеті є дефіцитним — не більше 4 кілограмів. Але є техногенний тритій. У всіх типах енергетичних реакторів у результаті низки побічних процесів утворюється і накопичується тритій. Завдяки його здатності швидко обмінюватися із вологою живих організмів, особливо у складі води та водяної пари, він належить до небезпечних радіонуклідів. З огляду на масштаби розвитку ядерної енергетики, необхідно вирішити проблему вилучення та концентрації тритію з вод електростанцій, рідких і газоподібних викидів з радіохімічних підприємств для переробки опроміненого ядерного палива.

Проблему вилучення та концентрації тритію можна розв'язати лише методами ізотопного розділення. Найефективнішим рішенням є розміщення ізотопного очищувального блоку на підприємстві з випромінюванням тритію, який забезпечує як концентрацію тритію в потоці відходів, зменшуючи його кількість (з урахуванням виключення під час ізотопного збагачення тритію до ринкового продукту), так і видобуток тритію за санітарним стандартами, що дозволяє скидати відходи в навколишнє середовище.

У цій дипломній роботі здійснюється проєктування ізотопної очисної установки для контурних вод ядерного реактора, що дозволяє видаляти тритій у вигляді товарного продукту.

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Ізотопи водню

Ізотопи – це різновиди одного й того ж хімічного елемента, атоми яких мають однаковий ядерний заряд (і, відповідно, майже однакові електронні оболонки), але відрізняються значеннями маси ядра.

Наразі прийнято позначати кожен ізотоп набором символів AX_Z , де X – символ хімічного елемента, Z – заряд ядра атома або його атомний номер, A – масове число ізоотопу (загальна кількість нуклонів — протонів і нейтронів у ядрі).

Водень природно зустрічається у вигляді трьох ізоотопів: протію – 1H_1 , дейтерія (важкий водень) – 2H_1 (D) та тритія (надважкий водень) – 3H_1 (T). Протій і дейтерій стабільні, тритій є радіоактивним. Існують докази існування ще чотирьох ізоотопів водню: 4H , 5H , 6H та 7H , які дуже нестабільні, час життя їхніх ядер виражений у значеннях порядку 10^{-22} – 10^{-23} секунд.

У вільному стані водень існує як двоатомна молекула, яка має спільну електронну оболонку. Отже, молекули містяться у суміші ізоотопів водню H_2 , D_2 , T_2 , HD , HT , DT . В Таблиці 1.1 показані властивості цих молекул.

Таблиця 1.1 – Параметри молекул водню.

	Температура кипіння, К	Потрійна точка		Критична точка		Густина, кг/м ³	
		Т, К	Р, кПа	Т, К	Р, кПа	рідина	газ
H ₂	20,4	13,9	7,3	32,9	1,3	70,8	1,3
HD	22,1	16,6	12,8	35,9	1,5	114,0	1,8

Продовження Таблиці 1.1

НТ	22,9	17,6	17,7	37,1	1,5	158,6	2,3
D ₂	23,6	18,7	17,1	38,3	1,6	162,5	2,2
DT	24,3	19,7	19,4	39,4	1,7	211,5	2,7
T ₂	25,0	20,6	21,6	40,4	1,8	260,1	3,1

1.1.1. Протій. Легкий водень

Легкий ізотоп – це майже 99,99 % всього водню. Він забезпечує можливість термоядерного синтезу в надрах зірок, зокрема й Сонця, і завдяки йому утворюються інші елементи. Крім того, легкий водень відіграє важливу роль у побудові та функціонуванні живої речовини. Протій має ядро, до складу якого входить лише одна частинка — протон

Застосування. Легкий водень використовується у безлічі галузей: у хімічній промисловості, де з його допомогою здійснюється виробництво аміаку, метанолу, хлоридної кислоти та інших речовин, у нафтопереробці та металургії, де він необхідний для відновлення тугоплавких металів з оксидів. Водень слугує одним із видів ракетного палива і використовується в лабораторній практиці в науці та на виробництві.

1.1.2. Дейтерій. Важкий водень.

На Землі водень містить від 0,011% до 0,016% дейтерію. Його концентрація змінюється залежно від середовища: у морській воді цього ізотопу більше, а в складі, наприклад, природного газу, його значно менше.

Застосування. Вода, що містить два атоми дейтерію, називається важкою водою D₂O. Вона характеризується сповільненим перебігом хімічних реакцій, внаслідок чого у великих концентраціях вона є шкідливою для живих організмів.

мів. Тому дейтерій є незамінним у ядерній енергетиці як чудовий уповільнювач нейтронів. Він використовується в цій якості, а також як теплоносіє у важководних реакторах, що дозволяють застосовувати природний уран, а це знижує витрати на збагачення.

Важка вода завдяки високій сповільнювальній здатності та дуже низькому перерізу захоплення теплових нейтронів характеризується найбільшим коефіцієнтом сповільнення і є найкращим сповільнювачем нейтронів. Слід також зазначити, що за сповільнювальною здатністю щодо нейтронів у понад 3 рази ефективніша за графіт.

Висока теплоємність важкої води зумовлює її застосування також як теплоносія. Таким чином, основне споживання важкої води пов'язане з ядерною галуззю. Найбільшого поширення важководні енергетичні реактори набули в країнах, де відсутня технологія збагачення урану, оскільки вони дозволяють використовувати як ядерне паливо природний уран.

Найвідомішим типом важководного реактора є CANDU, принциповою особливістю якого є використання важкої води і як сповільнювача нейтронів, і як теплоносія для охолодження активної зони реактора. Окрім можливості використання природного урану, ці реактори мають також низку інших переваг, таких як менша витрата ядерного палива та внутрішня безпека.

1.1.3. Тритій. Надважкий водень.

Надважкий ізотоп водню, у ядрі якого є протон і два нейтрони. Він є м'яким β -випромінювачем з періодом напіврозпаду 12,43 року. Природний шлях утворення тритію в природі зумовлений ядерними реакціями, що відбуваються у верхніх шарах атмосфери під час взаємодії нейтронів, протонів, дейтронів космічного випромінювання з молекулами, що входять до складу повітря.





Природний тритій

Основним джерелом природного тритію є атмосфера, де він утворюється під час бомбардування ядер атмосферних газів (водню, кисню, аргону, азоту тощо) частинками космічних променів на два фрагменти: вуглець-12 і тритій. Розпад ізотопу відбувається з випусканням електрона (так званий бета-розпад), при цьому один нейтрон у ядрі зазнає перетворення на протон, а хімічний елемент підвищує атомний номер на одиницю, стаючи гелієм-3. У природі тритій присутній у слідових кількостях — його дуже мало.

Тритій може утворюватися на Сонці під час сонячних спалахів, а також на інших зорях. Близько 99 % загальної кількості космогенного тритію перетворюється на тритієву воду (НТО), яка згодом у вигляді дощу випадає на поверхню землі. У рослинах та організмах тварин встановлюється співвідношення концентрацій НТО та H_2O , близьке до того, що існує в навколишньому середовищі.

Штучний техногенний тритій

Основні джерела штучного тритію:

1. Викиди при тестуванні ядерної зброї.

Термоядерні вибухи – одне з джерел техногенного тритію. Штучний тритій, утворений внаслідок термоядерного вибуху, концентрується переважно у вигляді тритієвої води у високих шарах атмосфери. Протягом року пари тритієвої води мігрують у тропосферу, а звідти разом із опадами випадають на земну поверхню. На землі техногенна тритієва вода також вступає в загальний кругообіг води і може поглинатися рослинами, випаровуватися або мігрувати з ґрунтовими водами до річок чи океанів.

2. Ядерні реактори атомних електростанцій.

— Тритій утворюється в активній зоні реактора внаслідок потрійного поділу (утворення трьох уламків, одним із яких є тритій): у середньому приблизно на 10^4 поділів ^{235}U всього одне відбувається з утворенням тритію. Приблизно вдвічі більше утворюється тритію при розподілі ^{239}Pu ;

— Тритій утворюється в теплоносії в результаті захоплення повільних нейтронів ядрами дейтерію, що міститься у воді в кількості 0,015%. Тритій також утворюється при взаємодії нейтронів з бором, який входить до складу органів регулювання. Частина його доступна для вилучення і служить джерелом тритію.

3. Заводи для переробки опроміненого ядерного палива.

На установках з переробки палива тритій вивільняється з ТВЕЛів, що розчиняються під час їх переробки, у вигляді тритієвмісного водню (НТ) або тритієвмісної води (НТО), які потрапляють в атмосферу, у річки та озера.

4. Традиційним методом виробництва тритію є виробництво в реакторах, коли мішені з ізотопу літію-6 опромінюються нейтронами за наступною реакцією:



Нижче наведено графік на рисунку 1.1, що показує зміну концентрації тритію в біосфері Землі:

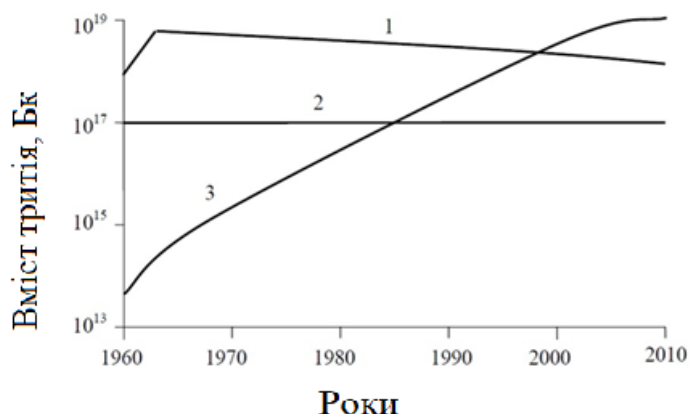


Рис. 1.1 Вміст тритію в біосфері Землі: 1 – викиди від ядерних випробувань; 2 – природне утворення внаслідок космічного опромінення; 3 – викиди від атомних електростанцій

Застосування. Наразі тритій широко використовується в мирних цілях:

- вибуховий компонент термоядерних (водневих) бомб;
- для проведення контрольованої термоядерної реакції;
- фарби, що світяться для шкал приладів;
- в експериментах із дослідження властивостей нейтрино;
- у створенні термоядерних боєприпасів;
- дейтерій-тритієві ініціатори використовуються як проміжні запали для термоядерного горіння;
- він використовується в лабораторній практиці для отримання маркованих зразків.

Він виявився незамінним у багатьох радіобіологічних експериментах завдяки порівняно великому періоду напіврозпаду, відносно високій питомій активності, чудовим авторадіографічним властивостям, що зумовлені низькою енергією бета-частинок. У фізиці тритій застосовують для виготовлення тритієвих мішеней, джерел світла та мікромішеней для лазерного термоядерного синтезу, у хімії та біології — як індикатори водню та вуглецевої структури. У радіаційній хімії тритій використовують для виявлення та ідентифікації продуктів радіолізу. Він знаходить усе ширше застосування в дослідженнях механізму й кінетики хімічних реакцій, а також під час дослідження реакцій переносу водню. У біологічних дослідженнях тритій використовують для визначення часу біологічного напіввиведення води з організму людини та тварин.

— тритій газоподібний може використовуватися в клінічній практиці для визначення об'єму вентиляції легень, а також у фармакологічних дослідженнях і експериментальній радіотерапії тощо.

Зберігання тритію. У випадках, коли рекомендується довгострокове зберігання, найкращим є зберігання газоподібного водню, що містить тритій, у зв'язаному стані. Метали, що формують гідрид, з високою ємністю водню, такі як уран, паладій, цирконій і титан, а також інтерметалічні сполуки типу $LaNi_5$. Найменш переважним зберіганням – у вигляді води, причому бажано також у вигляді твердих відходів.

Чистий тритій або його концентрат, взятий із низькотемпературної коло-
ни, мають бути перетворені у гідрид (третида або дейтерид- третида $Ti-D$) ти-
тана для довготривалого та безпечного зберігання. Розробка методів затвер-
дження водних відходів, що містять тритій, також здійснюється низкою науко-
вців у різних країнах. Для цього пропонуються як методи адсорбції, наприклад
із використанням цеолітів, так і затвердіння за допомогою зв'язуючих речовин
або полімерних матеріалів. У літературі опубліковано результати досліджень
процесу окиснення активованого губчастого дейтериду титану в атмосфері по-
вітря за кімнатної температури. Показано, що основним механізмом виділення
трیتیю з третиду титану є процес поверхневого окиснення зразків. Отримані
результати дозволяють вважати титан надійною з точки зору радіаційної безпе-
ки матрицею для зберігання ізотопів водню. При цьому слід зазначити, що цей
метод має низку недоліків, основними з яких є великий об'єм твердої фази вна-
слідок невеликої ємності за воднем (кілька відсотків), неможливість повного
вилучення (регенерації) трیتیю, складна конструкція контейнерів для зберіган-
ня тощо.

Зберігання водню, що містить тритій, у циліндрах під тиском обмежене
радіоактивною реакцією розпаду трیتیю з утворенням 3He . Через це з двоатом-
ної молекули водню (T_2 , HT или DT) утворюються дві одноатомні молекули ге-
лію, які в замкненому об'ємі призводять до підвищення тиску в межі — до 2 ра-
зів.

При зберіганні тритійованої води в рідкому стані відбувається реакція ав-
торадіолізу води, що призводить до утворення газоподібних 3He , кисню та вод-
ню, внаслідок чого в закритій ємності для зберігання тритійвмісної води спо-
стерігається підвищення тиску. При цьому слід зазначити: оскільки 1 г (0,05
моль) HTO відповідає активності трیتیю 1486 Ki , то навіть при високих концен-
траціях радіонукліда значного зростання тиску в ємності зберігання не відбува-
тиметься.

1.2. Атомна енергетика

1.2.1 Огляд ядерної промисловості

Наразі в енергетичному секторі впроваджено лише один клас ядерних процесів — поділ ядер важких елементів під впливом нейтронів.

Ядерний реактор - пристрій, в активній зоні якого здійснюється контрольована ланцюгова реакція, що самопідтримується, поділу ядер деяких важких елементів під дією елементарних частинок - нейтронів, які завдяки відсутності електричного заряду легко проникають в атомні ядра.

Найбільше атомних реакторів у США (104), Франції (59), Японії (54), Великій Британії (33) та Україні (15). Японія отримує 29% енергії на АЕС, Великобританія та США – по 18%. Атомна генерація України забезпечує близько 50% всієї електроенергії країни.

Проблеми розвитку ядерної енергетики

1. Безпека реактора. Принцип внутрішнього самозахисту активної зони реактора у випадку найгіршого сценарію з розплавленням активної зони має бути незамінною вимогою при проектуванні реакторів наступного покоління.

Під час роботи ядерних реакторів у світі сталося близько десяти серйозних аварій, три з яких — викиди радіонуклідів за межі контейнера, чого не було і досі немає в реакторах типу Чорнобиля. Невизначеність у сфері безпеки ніколи не буде повністю вирішена заздалегідь.

2. Ефективність виробленої електроенергії.

3. Зменшення викидів вуглекислого газу. Заміна теплових електростанцій на атомні може допомогти вирішити проблему зменшення викидів вуглекислого газу — одного з основних парникових газів, що сприяють потеплінню клімату на планеті.

4. Виведення з експлуатації реакторів на атомних електростанціях. За даними Всесвітньої ядерної асоціації, 130 промислових ядерних установок були

виведені з експлуатації або очікують на цю процедуру. Існує проблема утилізації радіоактивних відходів, так званих «хвостів», на місці шахт тощо. Усі його частини мають бути розібрані, а радіоактивні залишки будівель і частин реакторних споруд — поховане. Єдине технічне рішення для виведених з експлуатації реакторів або всієї атомної електростанції — це «консервувати» об'єкт на 30-100 років і захищати його.

5. Небезпека використання атомних електростанцій для поширення ядерної зброї. Кожен реактор щорічно виробляє достатньо плутонію для створення кількох атомних бомб. Відпрацьоване ядерне паливо (SNF), яке регулярно розвантажується з реакторів, містить не лише плутоній, а й цілий набір небезпечних радіаційних елементів.

6. Накопичення радіоактивних відходів у ядерній енергетиці.

Класифікація ядерних реакторів

1. По характеру використання:

— експериментальні реактори, призначені для вивчення різних фізичних величин, вартість яких необхідна для проектування та експлуатації ядерних реакторів; потужність таких реакторів не перевищує кілька КВт;

— дослідницькі реактори, в яких нейтронні та гамма-квантові потоки, створені в ядрі, використовуються для досліджень у галузі ядерної фізики, радіаційної хімії, біології, для випробування матеріалів, призначених для роботи в інтенсивних нейтронних потоках (включаючи частини ядерного реактора), для отримання ізоотопів. потужність дослідницьких реакторів не перевищує 100 МВт. Утворена енергія, як правило, не використовується;

— ізоотопні (зброя, промислові) реактори, які використовуються для виробництва ізоотопів, що використовуються в ядерній зброї, наприклад ^{239}Pu ; у медицині;

— енергетичні реактори, призначені для отримання електричної та теплової енергії, що використовується в енергетичній промисловості, для опріснення води, для приводу в дію електростанцій кораблів, літаків і космічних

апаратів, виробництва водню та металургії тощо, теплова потужність сучасних енергетичних реакторів досягає 5 ГВт;

2. По спектру нейтронів:

— Реактор на теплових нейтронах.

У цьому типі реактора більшість поділу відбувається під час поглинання теплових (повільних) нейтронів. Через меншу стабільність ^{235}U , коли навіть повільний нейтрон потрапляє в нього, він одразу розділяється, на відміну від ^{238}U , який ділиться лише при ударі швидких нейтронів: більшість ядерних реакторів працюють на важких ізотопах ^{235}U . Але в природних зразках уранову руду її вміст становить лише 0,72%. Ця концентрація недостатня для розвитку ланцюгової реакції. Отже, руда штучно збагачується, доводячи вміст цього ізотопу до 3%.

Розділяема речовина, або ядерне паливо, поміщається у вигляді таблеток у герметично герметично запечатаних стрижнях, які називаються ТВЕЛ (тепловиділяючі елементи). Вони пронизують всю активну зону, заповнену сповільнювачем нейтронів;

— Реактор на швидких нейтронах.

По-перше, у швидкому нейтронному реакторі немає модератора. З розвитком генерації швидких нейтронних реакторів можна вирішити проблему самозабезпечення ядерної енергії паливом: під час їх роботи утворюється значна кількість плутонію, який потім можна використовувати як ядерне паливо. Різниця між реакторами такого типу та тепловими нейтронними полягає в тому, що швидкі нейтрони, які виникають після розпаду ^{235}U не сповільнюються, а поглинаються ^{238}U з подальшою трансформацією у ^{239}Pu . Тому швидкі нейтронні реактори використовуються для виробництва плутонію-239 військового класу та теплової енергії, яку генератори атомної електростанції перетворюють на електричну енергію.

Ядерне паливо в таких реакторах є ^{238}U , а сировиною ^{235}U . У природній урановій руді 99,2745 % приходить на долю ^{238}U . Коли тепловий нейтрон поглинається, він не поділяється, а стає ізотопом ^{239}U .

ТВЕЛі з сировиною (збагаченим ^{235}U) розміщуються в активній зоні реактора. Ця зона оточена зоною відтворення, яка являє собою ТВЕЛі з паливом (збідненим ^{238}U). Швидкі нейтрони, що виходять із ядра після розпаду ^{235}U , захоплюються ядрами ^{238}U . Внаслідок утворюється ^{239}U . Таким чином, нове ядерне паливо виробляється у швидких нейтронних реакторах. Рідкі метали або їхні суміші використовуються як охолоджувачі в швидких нейтронних ядерних реакторах;

- Реактор на проміжних нейтронах;
- Реактор зі змішаним спектром.

3. По розміщенню палива:

— Гетерогенні реактори, де паливо розміщується в активній зоні дискретно у вигляді блоків (що представляють собою циліндричні стрижні або пластини) між якими знаходиться сповільнювач. Блоки ядерного палива в гетерогенному реакторі називають тепловиділяючими збірками (ТВЗ), які є паливною касетою і розміщуються в активній зоні у вузлах правильної решітки, утворюючи осередки.

Паливна касета - конструкція з таблеток урану і збирає разом із ними корпус товщиною 10- 20 див і довжиною кілька метрів, що є видільником енергії з допомогою розпаду урану. Матеріалом корпусу зазвичай є цирконій;

— Гомогенні реактори, де паливо і сповільнювач представляють однорідну суміш. Недолік таких реакторів у тому, що гомогенна суміш, що циркулює по контуру, випускає сильне радіоактивне випромінювання, це вимагає додаткового захисту і ускладнює управління реактором. Тільки частина палива знаходиться в реакторі і служить для вироблення енергії, а інша частина – у зовнішніх трубопроводах, теплообмінниках та насосах. Даний тип реакторів не набув широкого поширення. В даний час для енергетичних цілей проектують лише гетерогенні реактори.

4. По виду палива:

- Ізотопи урану 235 та 233 (^{235}U та ^{233}U);
- Ізотоп плутонія 239 ($^{239}\text{Pu.}$);

- Ізотоп торія 232 (^{232}Th) (Перетворюючись у ^{233}U);
- Ядерне паливо, у вигляді таблеток поміщається в герметично закриті стрижні, які називаються ТВЕЛі (тепловиділяючі елементи - герметично заварена заглушками трубка, з таблетками палива.). Вони пронизують всю активну зону, заповнену сповільнювачем нейтронів.

5. За ступенем збагачення:

- Природний уран (0,71% складає ^{235}U ; 99,29% – ^{238}U). Ця концентрація недостатня для розвитку ланцюгової реакції. Отже, руда штучно збагачується, зводячи вміст цього ізотопу до 3%;

- Слабо збагачений уран (до 1,5%);

- Чистий ізотоп, що ділиться.

6. За типом теплоносія:

- H_2O (вода, ВВЕР);

- Газ, (Графітово-газовий реактор);

- D_2O , (Важка вода, Важководний ядерний реактор, CANDU);

- Реактор з органічним теплоносієм;

- Реактор із рідкометалевим теплоносієм;

- Реактор на розплавах солей;

- Реактор із твердим теплоносієм.

7. За родом сповільнювача:

- С (графіт, Графіто-газовий реактор, Графіто-водяний реактор);

- H_2O (вода, Легководяний реактор, ВВЕР);

- D_2O , (важка вода, важководяний ядерний реактор, CANDU): Важка вода має дуже низький ступінь поглинання нейтронів і дуже високі властивості затримки, що перевищують властивості графіту, внаслідок чого такі реактори працюють на незбагаченому паливі, що дозволяє не будувати складні й небезпечні заводи з збагачення урану. Але видобувати важку воду дуже дорого;

- Ве, ВеО;

- Гідриди металів;

- Без уповільнювача (Реактор на швидких нейтронах).
- 8. За конструкцією:
 - Корпусні реактори (активна зона має загальний захисний корпус, який витримує тиск теплоносія, що тече загальним потоком);
 - Канальні реактори (теплоносій підводиться до кожного каналу з паливною збіркою окремо; корпус реактора не навантажений тиском теплоносія, а цей тиск несе кожен окремий канал).
- 9. За способом генерації пари:
 - Реактор із зовнішнім парогенератором (ВВЕР);
 - Киплячий реактор.
- 10. За наявності захисного контуру:
 - Один (РБМК);
 - Два (ВВЕР).

Реактори, в активній зоні яких температура рідкого теплоносія нижче температури кипіння, називаються реакторами з водою під тиском, а реактори, всередині яких відбувається кипіння теплоносія, - киплячими.

1.2.2 Устрій ядерних реакторів

Будь-який ядерний реактор складається з наступних частин:

1. Активна зона (центральна частина реактора, де протікає самопідтримуюча ЯЦР і виділяється енергія) з ядерним паливом (служить для отримання енергії в ядерному реакторі, являє собою суміш матеріалів, що містять ядра, що діляться) і сповільнювачем нейтронів.

Так як нейтрони, що утворюються після розпаду ядер ^{235}U мають дуже високу швидкість, ймовірність їх захоплення іншими ядрами урану в сотні разів менше ймовірності захоплення повільних нейтронів. І якщо не зменшити їхню швидкість, ядерна реакція може згаснути з часом. Уповільнювач і вирішує завдання зниження швидкості нейтронів. При цьому для ланцюгової реакції в реакторі знадобиться менша кількість ядерного палива.

2. Відбивач нейтронів — шар речовини (графіту, важкої води), що оточує активну зону ядерного реактора і слугує для зменшення витоку нейтронів з активної зони; дозволяє зменшити критичну масу речовини, що ділиться, і збільшити об'єм потужності з одиниці об'єму активної зони. Як матеріал для відбивачів часто використовують ті самі речовини, що й у сповільнювачах;

3. Теплоносій (для відведення енергії, що виділяється). Як теплоносій у ядерних реакторах часто використовують звичайну природну воду, попередньо очищену від різноманітних домішок і газів. У важководних реакторах теплоносієм слугує важка вода D_2O , а в реакторах із рідкометалевими теплоносіями — розплавлений метал.

4. Корпус ядерного реактора. Це герметичний бак, призначений для розміщення активної зони та інших пристроїв, а також для організації безпечного охолодження ядерного палива за допомогою потоку охолоджуючої рідини.

5. Система ланцюгової реакції, включаючи аварійний захист. Вона складається з набору стрижнів діаметром кілька сантиметрів і довжиною, порівнянню з висотою сердечника, що складається з нейтронних поглинаючих речовин (матеріал, що сильно поглинає нейтрони, зазвичай включає борні сполуки). Стрижні розташовані у спеціальних каналах і можуть підніматися або опускатися в реактор. Коли їх піднімають, вони сприяють прискоренню реактора, а при опусканні — вимикають його. Стержнівні приводи регулюються незалежно один від одного, тому їх можна використовувати для регулювання швидкості реакції в різних частинах сердечника);

6. Радіаційний захист;

7. Система дистанційного керування.

Для того, щоб ядерний реактор міг працювати, необхідно мати розділяему речовину, яка під час розпаду виділяє елементарні частинки, що можуть спричинити розпад інших ядер.

Поділ атомного ядра може відбуватися спонтанно або при влучанні в нього елементарної частинки. Як ділюча речовина нині можуть використовуватися ізотопи ^{235}U та ^{238}U , а також ^{239}Pu . Спонтанний розпад у ядерній енергетиці не

використовується через дуже низьку його інтенсивність, тому для розпаду будь-якого атомного ядра необхідне влучання в нього елементарної частинки з певною енергією (величина цієї енергії має лежати в певному діапазоні: повільніша або швидша частинка просто відштовхнеться від ядра, не проникнувши в нього). Такими частинками є нейтрони.

8. В ході ядерної ланцюгової реакції: ядра урану або плутонію розпадаються, при цьому утворюються два-три ядра елементів середини таблиці Менделєєва, виділяється енергія, випромінюються гамма-кванти і утворюються два або три нейтрони, які, у свою чергу, можуть відреагувати з іншими атомами і, викликавши їх.

Проблема поширення тритію

Проблема поширення тритію в навколишньому середовищі виникла у зв'язку з розвитком атомної технології.

Тритій, або радіоактивний водень, неминуче утворюється в будь-якому реакторі під впливом нейтронів на будь-які водневмісні речовини. Він є надзвичайно рухливим ізотопом водню і здатний при нагріванні проникати крізь сталеві стінки реактора. Не існує фільтрів, ефективних хімічних чи інших пас-ток, здатних затримати тритій, тому він потрапляє в навколишнє середовище і забруднює ґрунтові води навколо всіх АЕС.

Кількість викидів тритію залежить від типу реактора, його параметрів, потужності тощо. У таблиці 1.2 представлені значення сумарних газових і рідких скидів тритію у вигляді НТО (згідно даних United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) для різних типів АЕС.

Таблиця 1.2 – Викиди тритію у вигляді НТО для різних типів реакторів

Тип реактора	Викиди в 1985 г.(данні UNSCEAR за 1993 г.) ТБк/рік	Тип реактора	Викиди в 1997 г. (данні UNSCEAR за 2000 г.) ТБк/рік

Реактор на важкій воді (HWR) (Канада)	600	Реактор на важкій воді (HWR) (Канада)	600
Реактор з водою під тиском (PWR) (Дьябло-Каньон)	17	Реактор з водою під тиском (PWR) (Дьябло-Каньон)	55
Сучасний газоохолоджуваний реактор (AGR) (Сполучене Королівство)	12	Сучасний газоохолоджуваний реактор (AGR) (Сполучене Королівство)	18,7
Реактор з киплячою водою (BWR) (Німеччина)	2	Реактор з киплячою водою (BWR) (Німеччина)	1,6

Слід зазначити, що встановлені нормативні ліміти в Канаді на кілька порядків вищі за стандарти європейських країн. Водночас встановлені граничні значення для викидів *HTO* значно вищі, ніж наведені в таблиці 1.2. Таким чином, встановлені граничні значення фактично не обмежують кількість тритію, що викидається в навколишнє середовище під час нормальної роботи реакторів, оскільки вони в десятки і тисячі разів перевищують реальні викиди в Канаді.

Основний внесок у зростання виробництва тритію роблять 47 ядерних реакторів важководних атомних електростанцій.

Важководний реактор – ядерний реактор, у якому роль теплоносія та уповільнювача нейтронів відіграє важка вода (D_2O , оксид дейтерію), а як паливо використовується природний, незбагачений уран.

До групи важководних енергетичних реакторів (за міжнародною класифікацією – *PHWR* (Power Heavy Water Reactor) належать реакторні установки типу *CANDU* (Canada Deuterium Uranium). На сьогодні у 7 країнах експлуатуються 44 ядерні енергоблоки з реакторами *CANDU*, ще 4 блоки – будуються.

Як зазначалося раніше, *CANDU* можуть працювати на природному, незбагаченому урані, що значно здешевлює атомну енергію. У них можна допалювати опромінене реакторне паливо, повністю замикаючи ядерний паливний цикл і багаторазово зменшуючи обсяг відходів АЕС. Останні вдосконалення

канадських розробників конструкції активної зони *CANDU-6* дозволили досягти нульового коефіцієнта радіоактивності у разі аварійної втрати теплоносія.

Таким чином, використання дешевшого палива для реакторів створює проблему тритію, що потрапляє в навколишнє середовище. Необхідне проведення комплексної ізотопної очистки важкої води. Якщо вирішити цю проблему, ядерна енергетика отримає різке прискорення. Це дійсно стане проривом всесвітньоісторичного значення.

1.2.3 Важководний ядерний реактор *CANDU* – 600

Під час роботи важководного реактора важка вода D_2O забруднена іншими ізотопами водню — легким воднем (протієм, H) та тритієм (T).

Джерелами утворення протію в реакторі на важкій воді є реакції швидких нейтронів і жорстких гамма-квантів із конструктивними матеріалами реактора, що призводить до розщеплення протонів. Серед них $^{50}Cr(n,p)^{50}V$, $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$, $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$, $d(\gamma,p)n$ та деякі інші. Значний внесок у забруднення протієм робить розведення ізотопів під час хімічного очищення модератора: у процесах фільтрації, дистиляції тощо. Тому для підтримки нормальної роботи важководного реактора необхідно підтримувати концентрацію протію в модераторі не більше ніж 0,5%.

У важкій воді, при активації нейтронами, утворюється тритій, який потім хімічно зв'язується з оксидом дейтеротритію – *DTO*. В реакторах *CANDU*, побудованих в Онтаріо, утворюється в середньому 1,5 млн. Кі тритія щороку на кожному з блоків. Крім того, якщо з теплоносія не видаляється радіогенний 3He (продукт розпаду тритію), його реакція $^3He(n,p)t$ з нейтронами будь-якої енергії буде утворюватися тритій. Інші реакції, типові для реакторів усіх типів (потрійне розділення, $^{14}N(n,t)^{14}C$ та ін.), вносять значно менший внесок. Утворення тритію не суттєво погіршує ядерні та фізичні властивості важкої води, але призводить до збільшення дозового навантаження на персонал внаслідок вдихання водяних парів, що містять тритій. Розрахунки та практика експлуатації важко-

водних реакторів показують, що критичні значення для тритію та протію можуть бути перевищені вже через 4-5 років після введення реактора в експлуатацію.

Основні реакції, що відбуваються в ядерному реакторі, включно з збагаченням важкої води:

1. Поглинання нейтронів ядрами дейтерію:



2. Поглинання нейтронів ядрами гелію:



3. Тритій розпадається на 3_2He випромінюючи β – електрон і антінейтрино:



4. Інші реакції збагачення важкої води:



Під час роботи реактора отриманий тритій потрапляє в атмосферу переважно у вигляді тритійвмісної водяної пари, через димові труби та витяжну систему. Однак більшість викидів спричинені наявністю витоку водяної пари, що містить тритій, з апаратів, насосів, ущільнень, труб, стінок реакторів тощо.

Як зазначалося вище, внаслідок витоків виникає втрата важкої води з контурів водяного охолодження реактора *CANDU* сягають 3 % від загальної кількості на рік витоків ретардерів оцінюються на рівні 0,1 %.

Однак основна кількість викидів тритію ($\sim 2/3$) виникає через сповільнювач, що зумовлено значно вищою концентрацією тритію в ньому ($\sim 20-30$ разів) порівняно з теплоносієм.

Щоб запобігти підвищенню концентрації тритію в реакторах важкої води, створено установки детриталізації. Такі об'єкти працюють, наприклад, у Канаді, Кореї, Румунії тощо.

Але робота установок очищення тритію фактично не призводить до зниження забруднення навколишнього середовища, і їхня основна мета — підтримувати певний встановлений рівень концентрації тритію в реакторах важкої води, що забезпечує їх безперервну роботу при забезпеченні об'єму викидів у регульованих межах. Наприклад, для реакторів *CANDU* вважається допустимим підтримувати рівень концентрації тритію в модераторі на рівні 10 Ки/кг, а в теплоносію - 2-3 Ки/кг.

У США та Канаді в рамках існуючих концепцій управління тритієм обробка відходів, що містять тритій, вважається доцільною, якщо це може слугувати економічно доцільним способом отримання «продуктного» тритію (у вигляді T_2) з концентрацією не менше 90%.

Принцип роботи реактора *CANDU*.

У реакторах *CANDU* важководний теплоносію у межах активної зони розподіляється по паливних каналах (рис. 1.2), тобто індивідуальних трубах, що містять ППС (паливно-повітряну суміш). У першому контурі підтримується тиск приблизно 10 МПа. Температура теплоносія на вході в паливний канал становить 267 °С, на виході 310 °С.

Для теплоізоляції сповільнювача паливні канали розміщені в інших трубах таким чином, що утворюється кільцевий газовий зазор. 390 таких двостінних труб розташовані горизонтально в корпусі реактора, заповненому важкою водою з тиском, близьким до атмосферного. Кожна канална труба через колектор з'єднана з циркуляційним насосом і парогенератором. Для підтримання необхідного тиску перший контур обладнаний компенсатором тиску.

Важкий сповільнювач міститься в корпусі-каландрі, який має власну систему охолодження; його температура підтримується приблизно на рівні 70 °С, тиск близький до атмосферного. Перший контур теплоносія складається з двох

петель, з'єднаних у формі вісімки та обладнаних циркуляційними насосами й парогенераторами. У другому контурі використовується звичайна вода для отримання пари, що живить турбогенератор. ККД енергоблока з реакторами *CANDU* становить 29,4%.

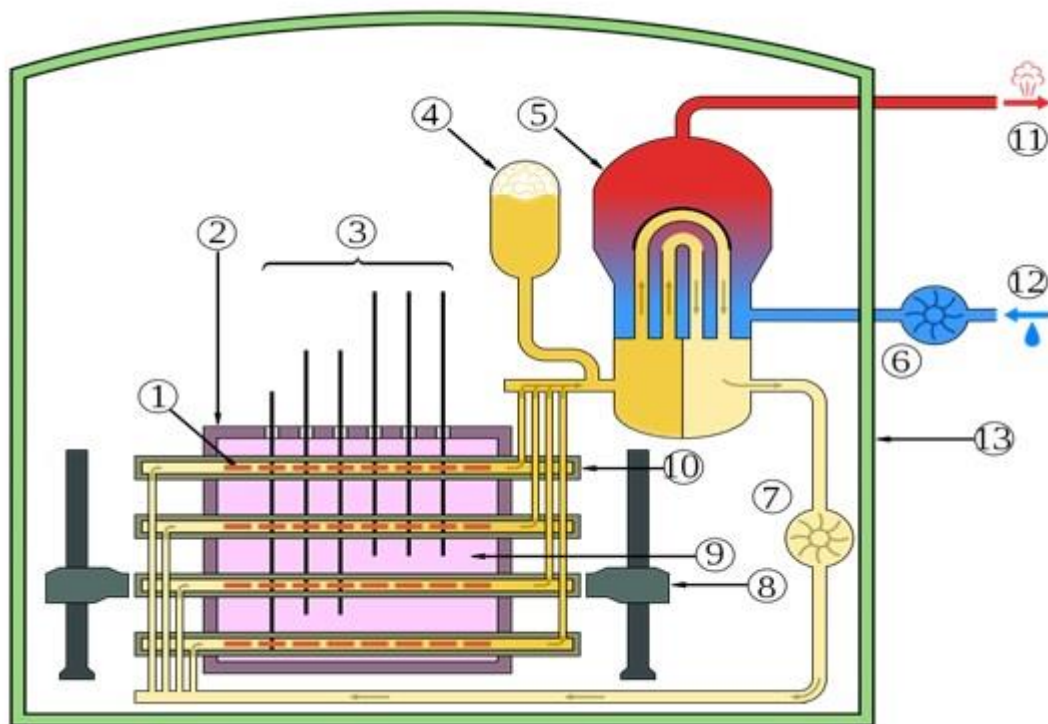


Рис. 1.2 Схема реактора *CANDU*: 1 – твели; 2 – каландрія (корпус реактора); 3 – стрижні СУЗ; 4 – компенсатор тиску; 5 – парогенератор; 6 – живильний насос; 7 – головний циркуляційний насос; 8 – паливоперевантажувальна машина; 9 – сповільнювач (важка вода); 10 – технологічні канали; 11 – пара на турбіну; 12 – конденсат із турбіни; 13 – гермооболочка.

Паливо. Природний діоксид урану використовується як паливо в реакторах *CANDU* (0,72% ^{235}U). Трубка з циркулюючим зовнішнім діаметром 13,1 мм з їх таблетками UO_2 (2) формують твели. 37 твелів об'єднаний у циліндричний промінь, формують ТВС. У кожен паливний канал реактора завантажується комплект з 12 таких ТВС.

Кільцева газова система. Це унікальна система, притаманна лише реакторам *CANDU*. Вона забезпечує теплоізоляцію між нагрітим теплоносієм і холодним сповільнювачем (для підвищення ефективності експлуатації реактора спо-

вільнювач має бути холодним). Оператори енергоблоків з *CANDU* використовують також результати вимірювань паровмісту в кільцевій системі для детектування малих течій з технологічних каналів (труб під тиском).

Контроль за емісією тритію здійснюється за допомогою систем збору вологи та водяної пари в контейнері. Ці системи є високовартісними та трудомісткими в обслуговуванні, а їх наявність на станції робить вагомий внесок у витрати на експлуатацію реакторів *CANDU*.

Сповільнювач.

У типовому реакторі *CANDU* міститься близько 450 тон важкої води загальною вартістю щонайменше 250 млн доларів.

У реакторах *CANDU*, побудованих в Онтаріо, утворюється в середньому 1,5 млн Кі тритію на рік на кожному енергоблоці.

1.3. Установки ізотопного очищення

1.3.1. Методи розділення ізотопів

Серед існуючих методів поводження з тритієм, що дозволяють провести його концентрування з метою скорочення кількості відходів, які підлягають захороненню, слід відзначити рециркуляцію тритієвмісних технологічних потоків, внаслідок чого зростає концентрація тритію в циклі, а також адсорбційний спосіб уловлювання тритію з відповідного потоку у вигляді водню або води на цеолітах чи гідридоутворювальних матеріалах. Однак ці методи обмежені фізико-хімічними властивостями робочих речовин (сорбційна ємність сорбентів, радіаційна стійкість речовин, що входять до складу технологічних потоків) і, крім того, не дозволяють вирішити завдання ізотопного очищення від тритію та отримання його в чистому вигляді. Єдиним шляхом розв'язання всіх зазначених вище завдань є використання методів розділення ізотопів. Ці методи дозволяють як мінімізувати кількість радіоактивних відходів, що підлягають захороненню (як у випадку очищення від тритію скидних потоків), так і вирішити задачу розділення ізотопів водню за безвідходною технологією з отриманням ці-

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист
						28
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		

льових продуктів (практично моноізотопних протію, дейтерію, тритію). Для розділення ізотопів різних елементів було розроблено цілу низку фізичних та фізико-хімічних методів.

Під реакцією хімічного ізотопного обміну (ХІО) елемента розуміють процес перерозподілу його ізотопів між молекулами різних хімічних форм цього елемента. Відхилення від рівноймовірнісного розподілу ізотопів між молекулами різних речовин або фазами однієї речовини за рівноважних умов свідчить про наявність термодинамічного ізотопного ефекту (ТІЕ).

Найбільші ізотопні ефекти спостерігаються при водневому обміні, і, перш за все, при ізотопному обміні тритію. Величину термодинамічного ізотопного ефекту зазвичай характеризують коефіцієнтом розділення бінарної суміші ізотопів α , що являє собою відношення концентрацій ізотопів, виражених у відносних частках, у двох різних речовинах або фазах гетерогенної системи, які перебувають у рівновазі. Коефіцієнт розділення більший за одиницю. Отже, при термодинамічному ізотопному ефекті концентрація важкого ізотопу в речовині А (фазі 1) буде вищою, ніж у речовині В (фазі 2).

Окрім коефіцієнта розділення, рівновага реакції ізотопного обміну може характеризуватися константою рівноваги. При ТІЕ (термодинамічному ізотопному ефекті) константа рівноваги відхиляється від граничної величини при $t \rightarrow$ нескінченності, яка відповідає рівноймовірному розподілу ізотопів між молекулами, що беруть участь в обміні, і дорівнює відношенню добутків чисел симетрії молекул вихідних речовин і продуктів реакції.

Значення коефіцієнта розподілу та рівноважної константи збігаються лише у випадку обміну ізотопами між молекулами, кожна з яких має по одному ізотопу, а також для реакцій ХІО одного атома.

Гетерогенні системи, як правило, характеризуються одночасним відбуванням кількох процесів ізотопного обміну. Внаслідок таких паралельних процесів ізотопні концентрації встановлюються у рівноважних фазах, залежно від коефіцієнтів розділення кожного конкретного процесу обміну ізотопами (реакції ХІО та ФІО).

У більшості випадків суміші ізотопів водню, а також суміші ізотопів інших елементів можна вважати ідеальними незалежно від стану агрегації речовини. Це дає змогу розрахувати коефіцієнт відокремлення процесу ФІО від властивостей окремих речовин, тобто зв'язати α з ізотопними ефектами властивостей речовин.

Характерною рисою реакцій ХІО, яка відрізняє їх від звичайних хімічних реакцій, є те, що молярні концентрації реагуючих речовин залишаються незмінними, і єдиним результатом процесу є перерозподіл ізотопів між компонентами. Ще однією особливістю реакцій ХІО є те, що всі вони оборотні.

Повертаючись до проблеми тритію для важководних реакторів, слід пам'ятати, що в цьому випадку важка вода, що містить тритій, не може вважатися ЖРО, тому необхідно очистити її від тритію з подальшим поверненням до замодерувального контуру або охолоджувача реакторної установки. Розв'язання проблеми очищення важкої води з тритію можливе лише за допомогою фізико-хімічних методів розділення ізотопів.

Оскільки коефіцієнт збагачення ізотопів, як правило, малий, а концентрація цільового ізотопу в початковому потоку низька, для отримання високонасиченого продукту необхідно організувати процес розділення так, щоб один ефект розділення повторювався багато разів. Принципи множення одного ефекту можна реалізувати або шляхом протитокового руху збагачених і бідних потоків у каскаді елементів розділення, або шляхом зменшення залишкової суміші, яку потрібно розділити.

Також слід розуміти, що величина ступеня розділення, яку повинна мати установка для вилучення тритію та його концентрування, залежить від конкретного завдання. Якщо передбачається отримання водню з високим вмістом тритію (95–98 % ат.), що є доцільним при значних концентраціях тритію у вихідній воді (кілька Кі/л і вище), то величина необхідного ступеня розділення становитиме $10^6 - 10^7$. При вилученні тритію з водних потоків, вміст тритію в яких є низьким ($10^{-4} - 10^{-2}$ Кі/л), отримання товарного тритію недоцільне, тому отримують тритієвий концентрат, який підлягає захороненню.

На даний момент у світі діє три індустріальні установки з очищення важкої води від тритію: Darlington (Канада, Гамільтон), Romania (Румунія, Бухарест), Wolsong (Південна Корея, м. Наєрі).

У таблиці 1.3 представлені основні технології, які знаходили застосування для вирішення різних завдань поділу ізотопів водню.

Таблиця 1.3 – Використовувані технології поділу ізотопів водню

Метод	Робоча температура, К	Коефіцієнт поділу суміші DT, α	Енерговитрати, МВтг/кг D ₂ O
Електроліз води	313-333	2,00	60,00
Water Distillation (WD)	333	1,01	40,00
Bithermal Hydrogen Water (BWH)	303/403	1,70/1,20	2,00
Liquid Phase Catalytic Exchange (LPCE)	298	1,67	30,00
Vapor Phase Catalytic Exchange (VPCE)	473	0,72	30,00-40,00

У таблиці 1.4 представлено порівняння методів поділу етапу концентрування тритію за кількістю витрачається енергії на отримання 1 г продукційного тритію.

Таблиця 1.4 – Методи поділу етапу концентрування тритію

Метод	Енерговитрати, МВтг/р T ₂
Liquid Phase Catalytic Exchange (LPSE)	143 500
Cryogenic Distillation (CD)	12 000
Combined Electrolysis Catalytic Exchange (CECE)	54 000

Електроліз води - є одним з найбільш привабливих способів поділу ізотопів водню внаслідок великих значень коефіцієнта поділу (α), що характеризує відношення відносних концентрацій важкого ізотопу (дейтерію або тритію) в

збагаченій і збідненій ним фракціях. Саме електроліз був першим методом одержання важкої води. В його основі лежить ізотопний ефект поділу, що має місце при розкладанні води на водень та кисень під дією електричного струму.

Переваги:

- велика величина коефіцієнта поділу;
- досягнення більшої концентрації видобувного ізотопу, як наслідок зменшення масштабів апаратів, наступної стадії концентрування.

Недоліки:

- високі енерговитрати, так на одержання 1 м³ водню потрібно 4,5 – 5,5 кВт·год електроенергії. Тому використання такого типу установок виправдане під час переробки тільки такої цінної сировини, як важка вода та економічно недоцільне при очищенні від тритію звичайної, легкої води.
- пожежонебезпечність, у разі збоїв у роботі або відхилення співвідношення газів, що подаються від оптимального в апараті і за ним утворюється гримуча суміш, можливий її вибух, і це, у поєднанні з наявністю тритію в установці, створює ще й додаткові проблеми забезпечення радіаційної безпеки, що накладає жорсткі вимоги на конструкцію води.

В даний час використовується як допоміжний процес отримання водню у складі інших способів поділу.

Друга група методів поділу ізотопів - *це методи ректифікації*, засновані на відмінності ізотопного складу між різними фазами робочої речовини, в якості якого можуть використовуватися водень, аміак і вода.

Для забезпечення розвиненої поверхні контакту фаз для забезпечення ефективного масообміну процес проводять у протиточних колонах з контактними пристроями тарілчастого або насадкового типу. Дані методи істотно програють електролізу з погляду коефіцієнтів поділу, проте виявляються набагато менш енерговитратними.

Процес WD (Water Distillation). Ректифікація води під вакуумом внаслідок своєї простоти була використана для отримання важкої води в США, де в 1943 - 1945 рр. були побудовані 3 установки із сумарною проектною продуктивністю

2,4т D₂O на місяць. Методом ректифікації води здійснювали концентрування дейтерію до 90 ат. %, а на стадії отримання продукту (до 99,8 ат. % дейтерія) використовували електроліз. Слід також відзначити, що в даний час метод ректифікації води під вакуумом є основним промисловим способом отримання важкоокислої води, а також води зі зниженим вмістом дейтерію, які знаходять застосування в дослідженнях медичного та біологічного напрямків.

Переваги:

— простота та безпека методу.

Недоліки:

— мінімальна величина коефіцієнта поділу, що зумовлює необхідність переробки великих потоків, тобто. створення великогабаритних розділових установок;

— потребує великих енергетичних витрат за випаровування води. Енергетичні витрати на цей процес практично визначають вартість очищення радіоактивних відходів (води) від тритію.

Процес CD (Cryogenic Distillation). Один із методів кінцевого концентрування продукційного тритію. Знаходить застосування в процесі детритизації важкої води і переробки тритій-вмісних рідких і газоподібних РАВ в основному в поєднанні з ізотопним обміном водню з водою. Дозволяє отримувати газоподібний дейтерій і три-тій з концентрацією більше 99%.

Переваги:

— відносно велике значення коефіцієнта поділу

Недоліки:

— використання каталізатора для здійснення реакції гомомолекулярного ізотопного обміну;

— процес є вибухонебезпечним і вихідний водень вимагає дуже глибокого ступеня очищення від домішок кисню;

— для НТР необхідні низькі температури (температура кипіння рідкого водню при атмосферному тиску - близько 23 К).

Хімічний ізотопний обмін. Найбільше застосування для вирішення різних завдань поділу ізотопів знаходять реакції хімічного ізотопного обміну (ХІО), які характеризуються значно вищими значеннями коефіцієнтів поділу, ніж методи ректифікації.

Процес VPCE (Vapor Phase Catalytic Exchange) з каталізаторами, як носій для активних металів (платина, палладій, нікель) використовувалися оксид алюмінію, активоване вугілля і т.п.

Переваги:

— велика величина коефіцієнта поділу;

Недоліки:

— ізотопний обмін водню з водою в паровій фазі вимагає додаткових витрат для випаровування води і характеризується труднощами організації протитечії між водою і воднем. Ця обставина значно обмежує роздільну можливість цього вузла системи ізотопного очищення, оскільки протиток фаз, що обмінюються, є необхідною умовою множення одноразового ефекту ізотопного поділу і досягнення великих ступенів поділу. Низька концентрація тритію в паровій фазі потребує великих розмірів концентраційних колон.

Процес LPCE (Liquid Phase Catalytic Exchange) здійснюють у протиточних колонах, заповнених шарами, що чергуються, або рівномірною сумішшю гідрофобного каталізатора і гідрофільної дрібної нерегулярної насадки. Зазвичай процес проводять за однотемпературним методом з використанням нижнього вузла обігу потоків електrolізера.

Проведені в різних країнах техніко-економічні оцінки показали, що одним з найбільш ефективних методів очищення водних потоків від тритія може з'явитися багатоступінчастий ізотопний обмін водню з рідкою водою, що здійснюється в присутності ефективних каталізаторів ізотопного обміну.

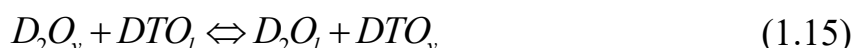


Розглянемо процес докладніше. Оскільки зерна каталізатора гідрофобні, вони не змочуються водою і водень разом з парами води вільно проникає в по-

ри носія каталізатора, де розташовані кластери платини. У разі очищення від тритію на платині йде реакція:



Щоб змістити рівновагу реакції, проводять реакцію фазового ізотопного обміну між парами води та рідкої води:



Реакція не вимагає каталізатора, проте її ефективність залежить від величини міжфазної поверхні та ефективності масопереносу. Якщо скласти реакції (1.13) та (1.14), то отримаємо сумарну реакцію (1.15).

Переваги:

— велика величина коефіцієнта поділу;

Недоліки:

— проблемою методу ХІО водню з водою є її верхній вузол обігу потоків, де необхідно безпечно та кількісно здійснювати конверсію водню у воду.

Процес BWH (Bithermal Hydrogen Water). Дана технологія так само заснована на реакції, що використовується в *CECE* – процесі, але не потребує електролізу води, що надходить на переробку. Для скорочення енергетичних витрат на електроліз, що є основною складовою вартості очищення від тритію, запропоновані установки, у складі яких використовуються колонні апарати для двотемпературного хімічного ізотопного обміну

Це дозволяє відмовитися від електролітичного розкладання всього потоку води, що переробляється, і істотно знизити вартість переробки.

Переваги:

— висока швидкість реакції ізотопного обміну, наявність досвіду експлуатації промислових установок;

Недоліки:

— необхідність використання дорогих каталізаторів;

— в основному застосовується при невисокому ступені очищення.

Процес LSPE (Liquid Solid Phase Exchange). Ізотопне очищення в системі: H_2 -Pd.

Переваги:

- процес протікає у сфері нормальних умов;
- можливість кінцевого концентрування без стадії каталітичного розкладання DT;
- невеликі витрати енергії.

Недоліки:

- висока вартість паладію, труднощі здійснення протитоку;
- володіє низькою продуктивністю через невисокі лінійні швидкості відносного руху твердої і газової фаз.

1.3.2. Огляд установок ізотопного очищення

Досвід створення установок детритизації важкої води є у більшості країн, що мають важководні реактори промислового, енергетичного чи дослідницького призначення. Проте в даний час у всьому світі експлуатуються тільки дві установки детритизації важководного сповільнювача промислового масштабу: в Канаді та Південній Кореї.

Далі розглянемо чотири, найбільш цікавих для вивчення УЮ, заснованих на поєднанні різних процесів (вивчених раніше).

1. Патент 2060801C1 (Сахаровський Ю.А., Розенкевич М.Б.).

Технологія очищення і концентрації тритію включає дві стадії:

1. Процес йде у двох послідовно з'єднаних колонах ізотопного обміну водню з рідкою водою та електролізері - нижній вузол звернення (процес CECE), в результаті чого отримують кондиційну важку воду, відвальну воду і концентрат тритію;

2. Концентрування до товарного тритію методом багатоступінчастого ізотопного обміну водню з гідротворною твердою фазою, переважно паладієм (процес *LSPE*).

Принцип роботи. Згідно з винаходом, очищення дейтерій вмісної води проводять у двох послідовно з'єднаних колонах ізотопного обміну водню з рідкою водою, в результаті чого отримують конденсаційну важку воду, відвальну воду і концентрат тритію, який у разі великої його кількості направляють на концентрування до товарного тритію методом багатоступеневого ізотопування переважно паладієм. Докладніше:

Установка забезпечена верхнім та нижнім вузлами обігу потоків (ВВОП та НВОП відповідно). Як НВОП використовують електролізер, що дозволяє подається в нього воду повністю перетворювати на водень і кисень. Як ВВОП використовують блок спалювання, переважно термokatалітичного, що виходить з колони ізотопного обміну водню, причому для спалювання використовують кисень, що утворюється в НУОП. Блок – схема представлена на рис. 1.3.

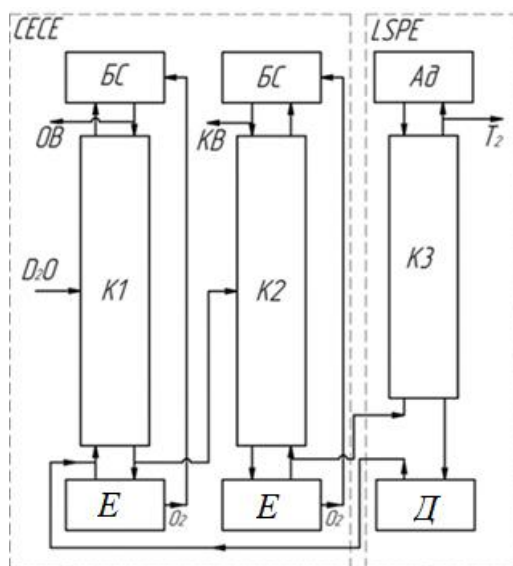


Рис. 1.3. Блок схема УІО, Патент 2060801С1

Колона складається з секцій, заповнених паладієвим сорбентом. На бідному та багатому кінці колони – вузли обігу потоків фаз (адсорбер та десорбер). Це накопичувальні ємності, співвідношення обсягів яких визначається конкретним завданням поділу: концентрацією тритію в продукті і ступенем вилучення

його з сировини. З потоку газу (на шляху в десорбер) виводять товарний тритій. Газ, що виходить з десорбера, повертають в установку для очищення некондиційної важкої води.

В якості робочої речовини при розділенні ізоотопів в системах газ - тверде тіло найбільший інтерес представляють тверді фази, що оборотно поглинають водень рід, які можна розділити на дві групи. У першій групі ізоотопний ефект зумовлений реакцією хімічного обміну ізоотопу між двома різними речовинами. Особливістю цих реакцій є те, що хімообмінна система складається з газоподібного водню і продукту його взаємодії з металом або ІМЗ (інтерметалідним з'єднанням). У другому випадку ізоотопні ефекти пов'язані з термодинамічною нерівноцінністю ізоотопів у молекулах газу і таких же молекул, сорбованих твердою фазою.

Область застосування таких систем – це поділ ізоотопних сумішей із високою концентрацією тритію.

Завдяки великим термодинамічним ізоотопним ефектам, високій швидкості реакції ізоотопного обміну, «м'яким» умовам сорбції та десорбції водню система H_2 -Pd, незважаючи на високу вартість паладію, виявилася поки що єдиною, яка використовується на практиці при поділі ізоотопів водню.

2. Патент 126185U1 (Костильов А.І., Покровський Ю.Г.).

Технологія очищення і концентрації тритію включає три стадії:

1. Ректифікація води під вакуумом (процес *WD*);
2. Двотемпературний ізоотопний хімічний обмін у системі вода - водень (холодна та гаряча колони, процес *BHW*);
3. Ізоотопний хімічний обмін у системі вода – водень з електролізером (процес *CECE*).

Принцип роботи. Вихідний розчин надходить у колону ректифікації K1, яка обладнана кубом-випарником і конденсатором парів. У кубі-випарнику вода випаровується і конденсується в накопичувальній ємності для прийому попередньо збагаченої тритієм води. При протиточному русі парів води та рідини в ході фазового ізоотопного обміну досягається збагачення води тритієм у ниж-

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист
						38
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		

ньому перерізі колони та очищення води від тритію у верхньому перерізі колони. Вода, що надходить з конденсатора у верхній переріз колони ректифікації K1 і практично не містить тритію, відбирається у вигляді потоку очищеної води. Попередньо збагачена тритієм вода з нижнього перерізу колони через накопичувальну ємність надходить на зрошення колони K2. У протитоці руху води в колонах K2 і K3 організовано рух водню. Блок - схема представлена на рис. 1.4.

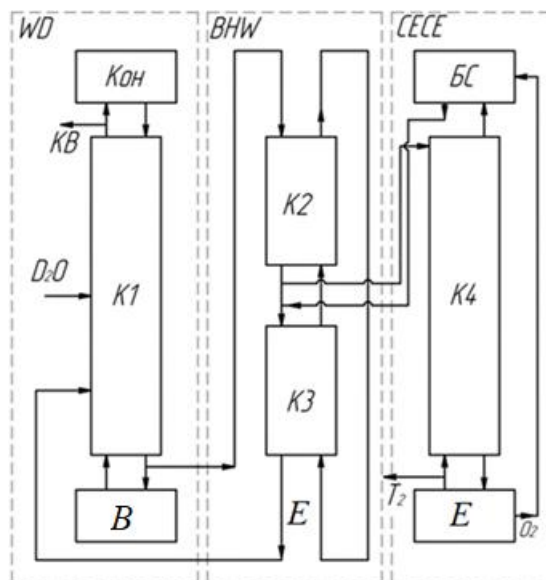


Рис. 1.4 Блок схема УЮ, Патент 126185U1

В результаті хімічного ізотопного обміну між водою і воднем в колонах досягається збагачення тритієм води на виході з колони K2 і збіднення тритію води в нижньому перерізі колони K3. Вода з проміжним збагаченням тритієм з нижнього перерізу колони K2 надходить на зрошення колони K4, а вода, збіднена тритієм, яка відбирається з нижнього перерізу колони K3, надходить для доочищення в колону ректифікації K1. Попередньо збагачена тритієм вода проходить через колону K4 і розкладається в електролізері водень і кисень.

Водень, що виділяється (основний потік) повертається в колону K4 і на виході колони спалюється до води в каталітичному пальнику. Для спалювання водню використовується кисень, що виділяється в електролізер при електролізі води. Спалювання водню в каталітичному пальнику виключає викид тритію в атмосферу і забезпечує повноту обігу фаз у колоні K4, що є необхідною умовою для досягнення високого ступеня концентрування. Вода, що виходить з пальни-

ку, містить тритій, повертається для доочищення на вхід в колону К3. При протиточному русі води та водню в колоні К4 в результаті ізотопного хімічного обміну відбувається концентрування тритію в нижньому перерізі колони та електролізері. Водень з високою концентрацією тритію частково відбирається на виході з електролізера перед входом у колону К4.

Установка дозволяє проводити очищення води від тритію до норм, що допускають її скидання в гідросферу, забезпечує високий ступінь концентрування тритію, що видобувається з води, і виключає скидання тритію в навколишнє середовище.

Установка ізотопного очищення Grenoble (France).

Технологія очищення і концентрації тритію включає дві стадії:

1. Каталітичний обмін між парами важкої води та газоподібним дейтерієм (процес *VPCE* – Vapor Phase Catalytic Exchange).
2. Низькотемпературна ректифікація (процес *CD* – Cryogenic Distillation).

Реакції каталітичного обміну:



Очищення важкої води від тритію здійснюється шляхом каталітичного обміну з газоподібним дейтерієм при температурі 200°C, але здійснюється у 8 послідовних щаблях. Кожен ступінь включає випарник води (І), перегрівач (ІІ), контактний апарат з каталізатором і конденсаційну сепараційну систему. Потoki води і газу в кожному ступені рухаються в одному напрямку, але при переході від ступеня до ступеня дотримується принцип протитоку.

Дейтерій збагачений ізотопами водню $HD/D_2/DT/T_2$ подається у дві послідовні колони низькотемпературної ректифікації, з концентруванням HD у верхній частині першої колони та концентрацією продукційного тритію в нижній частині другої колони. Блок - схема представлена на рис. 1.5.

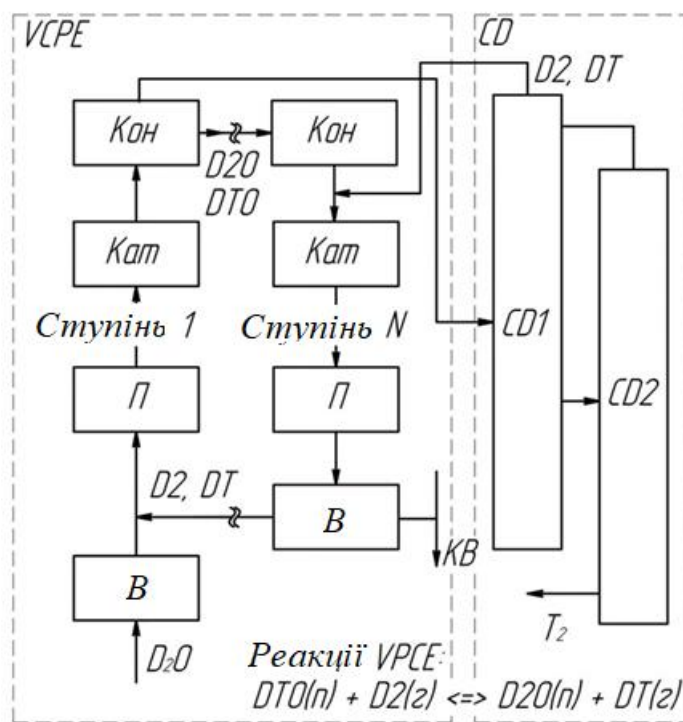


Рис. 1.5. Блок схема УІО «Grenoble»

7. Вище було сказано, що в діючих установках ізотопного очищення ступінь вилучення тритію порівняно невелика і для більш глибокого вилучення тритію необхідний каскад з великої кількості щаблів обміну "пари води-водень", що робить систему нетехнологічною. Тому ці установки не можуть бути використані для глибокого очищення від тритію важководних і легководневих відходів.

Установка ізотопного очищення EBIO – ЕСВР реактора ПІК.

Технологія очищення і концентрації тритію включає дві стадії:

1. Каталітичний ізотопний обмін у системі "рідка вода-водень" на гідрофобних каталізаторах з використанням електролізера як вузла обігу фаз (процес *CECE*).
2. Ступінь низькотемпературної ректифікації без наступного ступеня концентрування продукційного тритію. Блок – схема представлена на рис. 1.6.

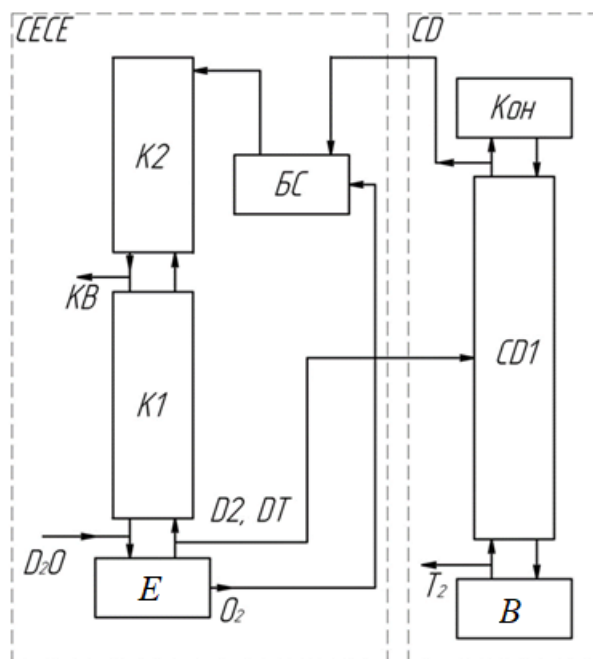


Рис. 1.6. Блок схема УІО «EBІО – ECBP реактора ПІК»

Система працює при температурі рідкого водню ($24-26K$) із гелієвою системою охолодження.

Колона ізотопного обміну заповнена шарами гідрофобного каталізатора, що чергуються, і гідрофільною спіралью – призматичною насадкою з нержавіючої сталі.

Дейтерій, що у результаті розкладання важкої води електролізері надходить вниз K1. Проходячи через колону, вода і газ вступають у складний контакт, що повторюється: на шарах гідрофобного каталізатора відбувається проточний ізотопний обмін між воднем і парою, а на шарах гідрофільної насадки - протиточний ізотопний обмін між парою і водою. В результаті цього, дейтерій, що піднімається вгору, постійно збіднюється по важкому ізотопу, в той час як стікає вода - збагачується.

Тяжка вода, що отримується в каталітичному випалювачі водню, подається на зрошення другої колони, у міру просування вниз збагачується дейтерієм до концентрації, що відповідає концентрації вхідного газу. Вода, що виходить з другої колони, подається на зрошення першої колони.

У режимі детритизації важка вода, що містить тритій, живить електролізер, а очищений від тритію дейтерій залишає першу колону і поступає на вхід в низ другої колони К2. Тяжка вода зі зниженим вмістом тритію відбирається в точці між колонами.

Висновок. Для ізотопного очищення важководних сповільнювачів в різні роки пропонувалися різні методи поділу ізотопів водню. Загальновизнаним на сьогоднішній день є комбінований підхід. Виділення тритію проводиться у два етапи, що пов'язано з радіолізом води за високої концентрації тритію. Початкове концентрування тритію проводять методом каталітичного ізотопного обміну водню з водою. Для глибшого концентрування до отримання чистого тритію використовують або низькотемпературну ректифікацію водню, або ізотопний обмін у системі «водень – твердий металевий гідрид».

2. ОПИС ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЕКТОВАНОЇ УСТАНОВКИ ІЗОТОПНОГО ОЧИЩЕННЯ

2.1. Опис принципу роботи установки

Для вирішення задачі очищення важкої води від тритію для того, щоб її активність не перевищувала заданий прийнятний рівень, частину важкої води з контуру реактора пропускають через установку ізотопного очищення. У цьому дотримуються, щоб кількість виведеного тритію, тобто. продуктивність установки відповідала швидкості його утворення в реакторі. Завдання очищення обумовлено необхідністю підтримки концентрації D_2O у сповільнювачі на досить високому рівні (не менше 99,7%).

Метод низькотемпературної ректифікації дозволяє поєднувати рішення задачі очищення важкої води від тритію з одержанням його в концентрованому товарному вигляді. Зрозуміло, що метод низькотемпературної ректифікації рідкого водню може використовуватися для вирішення завдань виділення тритію з водних потоків або важкої води після переведення ізотопів, що виділяються в газоподібний стан. Для цієї мети було обрано процес *CECE*, що представляє собою колону каталітичного ізотопного обміну в системі рідка вода-водень на гідрофобних каталізаторах з використанням електролізера в якості вузла обігу фаз.

Принцип роботи установки

Технологічна схема установки представлена на рис.2.1. Тяжка вода D_2O , з домішкою молекул DTO , накопичена в ресивері (*PI*) подається насосом дозатором (*H*) через фільтр (*Φ*) в колону каталітичного ізотопного обміну ($KIO = PKI$) витратою 400 кг/год.

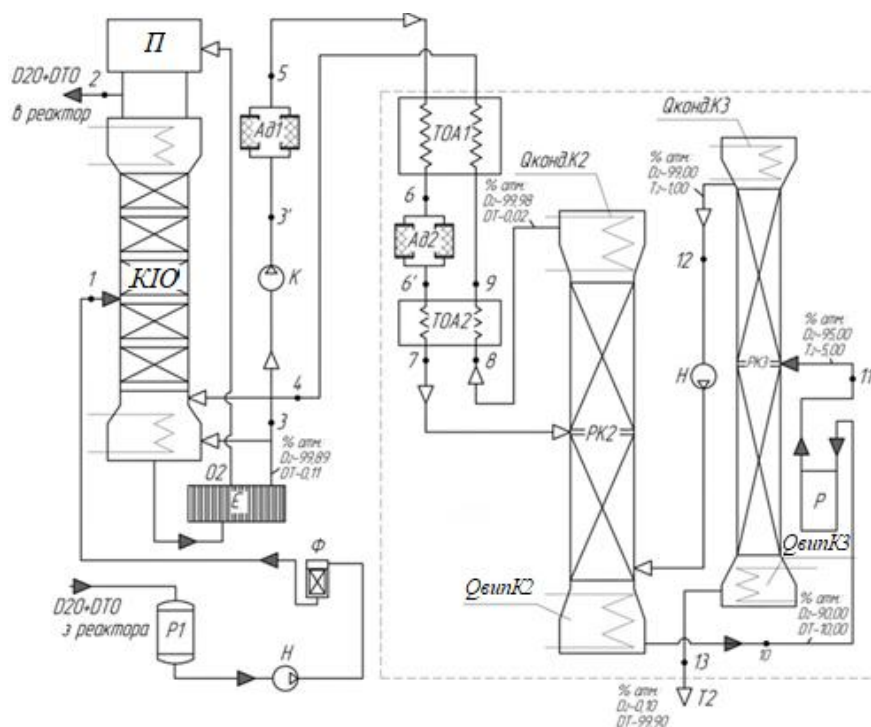


Рис.2.1 Принципова технологічна схема установки

Каталізатор у колонах *LPCE* може отруюватись домішками, що містяться у воді. Тому воду перед подачею в колону *LPCE* треба чистити. Для цього використовують іонообмінні смоли або випарні апарати на схемі позначені як фільтр (Φ).

Для захисту персоналу АЕС та запобігання викидам тритію в довкілля важководний сповільнювач необхідно детритувати до рівня менше 5 Ki/kg .

Перший ступінь очищення важкої води включає: колону каталітичного ізотопного обміну (*KIO*), лужний електролізер (*E*) і пальник (*П*).

Колони ізотопного обміну складаються з секцій (царг), які заповнені шарами гідрофобного каталізатора, що чергуються, і гідрофільною спіральнопризматичною насадкою з нержавіючої сталі. Використовуваний гідрофобний каталізатор був розроблений РХТУ ім. Д.І. Менделєєва. Він є платиною, нанесеною на сополімер стиролу з дивінілбензолом. Кожна секція має сорочку, що гріє, для підтримки температури колони в діапазоні: 300 – 360 K .

Робочий тиск *KIO*: 0,2 МПа.

Технологія ізотопного обміну в системі «рідка вода – водень» з використанням гідрофобного каталізатора дозволяє вести процес при помірних значеннях температури і тиску. Процес протікає у дві стадії:

1. ізотопний обмін між воднем та водяною парою на гідрофобному каталізаторі;
2. фазовий ізотопний обмін між парою та рідкою водою. Важлива особливість: необхідність обліку при розрахунку процесу окрім двох основних взаємодіючих зустрічних потоків (потoku води та потоку водню) ще й третього «внутрішньокolonного» потоку – потоку пари, що грає роль посередника, через який власне і відбувається обмін ізотопами водню між основними потоками.

Збагачена важкими ізотопами вода знизу колони виводиться в електролізер, де повністю розкладається.

Застосовується високотемпературний електроліз (рис.2.2). Якщо є можливість використовувати тепло АЕС, застосовується високотемпературний електроліз (1100 – 1300 K). Високотемпературний електроліз здійснюють із застосуванням осередків із твердим електролітом. Як твердий електроліт використовують оксид цирконію ZrO_2 , модифікований добавками оксидів для збільшення електричної провідності. Струм через нього переноситься іонами кисню, що утворюються при розкладанні води та виділенні P_2 на катоді:



На аноді розряджаються іони кисню, перенесені твердим електролітом:



Найкращий електродний матеріал – платина, яка через високу ціну замінюється нікелем для катода або нікелем з добавкою цирконію – для катода.

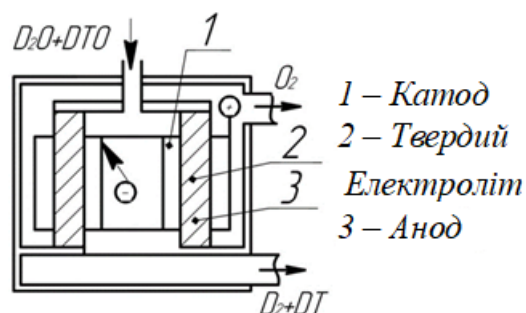


Рис.2.2 Схема процесу електролізу

Частина отриманого тритійвмісного дейтерію повертається в колону ізотопного обміну, а решта після очищення направляється в блок кріогенної ректифікації для виділення і концентрування тритію.

Дейтерій, що у результаті розкладання важкої води в електролізері, надходить донизу колони *KIO*. Проходячи через колону, вода і газ вступають у складний контакт, що повторюється: на шарах гідрофобного каталізатора йде прямоточний ізотопний обмін між воднем і паром, а на шарах гідрофільної насадки - протиточний ізотопний обмін між паром і водою. В результаті цього водень (дейтерій), що піднімається вгору, постійно збіднюється по важкому ізотопу, в той час як стікає вода - збагачується.

Кисень, що отримується в результаті електролізу, подається в пальник як паливо, де в поєднанні з збідненим по тритію газом дейтерієм утворює важку воду, збіднену за тритієм:



Тяжка вода зі зниженим вмістом тритію відбирається в точці між колоною *KIO* та пальником.

Потік газу D_2+DT з електролізера проходить осушення від вологи в адсорбері на силікагелі (*Aδ1*) і подається в блок низькотемпературної ректифікації. Там, охолоджуючись в *TOA1*, проходить кріоадсорбер (*Aδ2*), робоча температура якого 77 К. У ньому на фільтрі з активованим вугіллям потік очищається від домішок азоту N_2 і кисню O_2 . Далі, охолоджуючись до робочої температури колони *PK2*, надходить у середину колони.

Очищення потоку від домішок необхідне, тому що при температурі рідкого водню всі домішки, які можуть утримуватися в стисливому газі – переходять у твердий стан і, отже, накопичуватимуться у вигляді опадів в апаратурі, що порушує виробничий процес. Домішка кисню також створює небезпеку вибуху - затверділий кисень серед рідкого водню представляє вкрай небезпечну вибухову речовину. Тому зрідженню водню обов'язково має передувати його ретельне очищення від усіх домішок до рівня менше 10^{-9} мол. частки для кисню та 10^{-7} - 10^{-8} мол. частки суми інших вищевказаних домішок. Чим глибше очищення, тим більше безперервний пробіг обладнання (тривалість кампанії).

Блок кріогенної ректифікації обслуговується рефрижератором (компресор холодильного циклу знаходиться поза блоком) і має високовакуумну ізоляцію. Потік очищеного дейтерію, що відбирається з блоку кріогенної ректифікації, спалюється з киснем з електролізера у важку воду реакторної якості, яка повертається в реактор. Випарник та конденсатор *PK2* обігрівается та охолоджується рефрижераторним циклом, *PK3* охолоджується циклом, має електричний обігрів.

У колоні *PK2* відбувається низькотемпературна ректифікація ізотопів водню з концентруванням D_2 в конденсаторі колони, як низькокиплячого компонента та DT , як висококиплячого компонента, в кубі колони. Частково очищений від домішок дейтерій відводиться з колони та через теплообмінники повертається до системи ізотопного обміну на *KIO*.

З куба *PK2* суміш, збагачена компонентом DT , надходить на зрошення колони високого збагачення *PK3*. Для виділення чистого тритію суміш DT з рівня, трохи нижче середини колони, відбирають у конвертор (*P*), де йде реакція гомомолекулярного обміну. Реакції за участю молекулярного водню потребують застосування каталізаторів. Для того, щоб виділити молекули D_2 і T_2 , необхідно провести на каталізаторі реакцію ГМІО і ректифікувати трикомпонентну суміш.

Реакція гомомолекулярного обміну водню:



					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		48

В результаті вивчення кінетики реакції ГМІО на висококремністому цеоліті ZSM-5 з нанесеними іонами РЗЕ отримано низькотемпературний каталізатор, що володіє високою питомою каталітичною активністю в реакціях ГМІО. У рамках цього проекту, колона РКЗ розрахована як колона поділу двокомпонентної суміші. Реактор розташований до входу суміші колону РКЗ.

Після цього в нижній частині колони цю газову суміш використовують для вилучення тритію 99% атм., який періодично відводиться в спеціальні резервуари. Тритій фіксують та зберігають у вигляді тритидів титану та цирконію. Титанова трубка здатна поглинати 50 г або 18,5 ТБк тритію у вигляді тритиду.

Утворений при радіоактивному розпаді тритію ^3He продувається через конденсатор і колектор і виводиться із системи через контактний апарат спалювання ізотопів водню.

У системі теплової ізоляції низькотемпературного блоку підтримується вакуум до 10^{-3} Па.

2.2. Розрахунок основних параметрів роботи всього комплексу АЕС

Для вирішення завдання очищення важкої води та вилучення продукційного тритію з важководного реактора було взято та підібрано дані реактора CANDU – 6 та відомих установок очищення від тритію.

Суміш, що надходить до УІО:	$D_2O + DTO$
Швидкість генерації тритію:	$2 \cdot 10^6$ Ki/год (250 Ki/год)
Потужність реактора:	850 МВт
Підтримуваний рівень тритію:	3 Ki/кг
Маса важкої води:	265 тонн
Продуктивність ПІБ:	400 кг/год
Концентрація продукційного тритію:	99,9% атм.
Витрата продукційного тритію:	0,2 моль/год

Примітка. Бекерель (Бк) - визначається як активність джерела, в якому за одну секунду відбувається в середньому один радіоактивний розпад.

T_2O виробляється у незначних кількостях, і за великих масштабах реактора, натікання парів незначно, тобто. HDO не враховується під час розрахунку.

1 моль T_2 дорівнює $1,075 \cdot 10^{15}$ Бк

1 Кі дорівнює $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк

Кількість тритію n , Кі/кг, що напрацьовується в сповільнювачі реактора за два роки:

$$n = \frac{2 \cdot N}{M_{D_2O}} = \frac{2 \cdot 2,19 \cdot 10^6}{265000} = 16,53 \quad (2.5)$$

де N – кількість напрацьованого тритію протягом року, Кі/рік;

M_{D_2O} – маса важкої води в одному реакторі, кг.

Витрата тритію, що надходить до УІО, Кі/год:

$$n_{in} = G \cdot n = 400 \cdot 16,528 = 6,61 \cdot 10^3 \quad (2.6)$$

де G - витрата перероблюємої УІО важкої води, кг/год.

Витрата продукційного тритію, Кі/год:

$$n_{pr} = 5,811 \cdot 10^3 \quad (2.7)$$

Яка кількість тритію N_{T_2} , Кі треба видалити з важкої води, щоб його концентрація в ній була допустимою:

$$N_{T_2} = M_{D_2O} \cdot (n - 3) = 400 \cdot (16,528 - 3) = 3,58 \cdot 10^6 \quad (2.8)$$

Кількість днів роботи УІО для очищення чотирьох реакторів:

$$n_1 = \frac{4 \cdot N_{T_2}}{n_{pr} \cdot 24} = \frac{4 \cdot 3,58 \cdot 10^6}{5,8 \cdot 10^3 \cdot 24} = 103 \quad (2.9)$$

Кількість продукційного тритію m_{T_2} , кг, що напрацьовується установкою ізотопного очищення за кампанію:

$$m_{T_2} = g_{pr} \cdot M_{T_2} / 1000 \cdot n_1 \cdot 24 =$$

$$= 0,2 \cdot 6 / 1000 \cdot 103 \cdot 24 = 2,966 \quad (2.10)$$

де g_{pr} – витрата продукційного тритію, моль / год;

M_{T_2} – молярна маса тритію, г/моль.

Яка кількість тритію N_{T_2} , з розпадається на ^3He за кампанію УІО (період напіврозпаду тритію 12,32 року – це розпад 5,5% тритію на рік):

$$N_{T_2} = G_{in} \cdot n \cdot 24 \cdot n_1 \cdot M_T \cdot \frac{3,7 \cdot 10^{10}}{1,075 \cdot 10^{15}} \cdot \frac{0,055}{365} =$$

$$= 400 \cdot 16,52 \cdot 24 \cdot 103 \cdot 3,01 \cdot \frac{3,7 \cdot 10^{10}}{1,075 \cdot 10^{15}} \cdot \frac{0,055}{365} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ з} \quad (2.11)$$

де G_{in} – витрата, що подається на УІО, кг/год.

Кількість теплоти Q , Вт, що виділяється тритієм під час роботи УІО (1 атом тритію, розпадаючись, виділяє 18,59 кеВ енергії):

$$Q = \frac{N_{T_2} \cdot 18,59 \cdot 10^3 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3 \cdot m_{1a} \cdot n_1 \cdot 24} =$$

$$= \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 18,59 \cdot 10^3 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot 103 \cdot 24 \cdot 60} = 6,5 \quad (2.12)$$

Зміна концентрації продукційного тритію наприкінці кампанії:

$$\frac{0,2 \text{ моль / ч} - 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ моль / ч}}{0,2002 \text{ моль / ч}} = 0,997 \quad (2.13)$$

Орто – пара – конверсія під час роботи установки:

Суміш $D_2 + DT$ зазнає орто-пари-конверсію при адсорбційному очищенні активованим вугіллям. Оскільки активоване вугілля є каталізатором орто – пара – конверсії.

Потужність N_{op} , Вт, що виділяється при орто – пара – переході:

1. З температурних рівнів – 300 До 77 К (вихід з адсорбера №2)

$$N_{op} = (33,3\% - 28,0\%) \cdot G_3 \cdot Q_{op} = 5,3\% \cdot 455 \cdot 45,8 = 0,307 \quad (2.14)$$

де Q_{op} – теплота орто – пара – переходу, Дж/моль.

2. З температурних рівнів – 77 К до 26 К (вихід із ТОА №2)

$$N_{op} = (28,0\% - 5,0\%) \cdot G_3 \cdot Q_{op} = 23,0\% \cdot 455 \cdot 200 = 5,8 \quad (2.15)$$

Оцінимо час мимовільного орто – пара – перетворення на рідкому дейтерії. Частка $p - D_2 - x$ пов'язана з часом перетворення τ (година) наступною залежністю (x_0 – первісна частка $p - D_2$):

$$x = \frac{1}{1/x_0 + 12,65 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}} \quad (2.16)$$

На рис. 2.3 представлена залежність частки ортодейтерію в рідкому дейтерії.

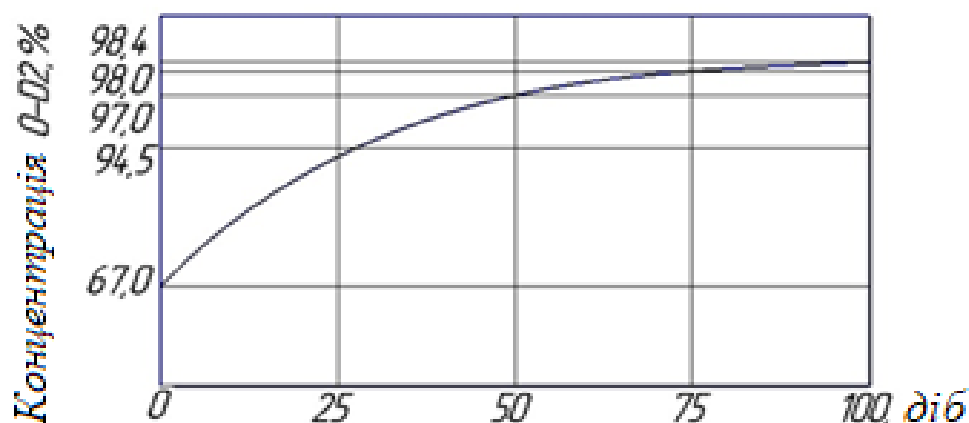


Рис. 2.3 Залежність зміни частки орто-дейтерія в рідкому дейтерії

2.3. Розрахунок параметрів роботи технологічних вузлів УІО

Вхідні дані для розрахунку:

Концентрація тритію в продукційному потоці, x_{T13} % атм.	99,90
Витрата важкої води на вході в установку G_1 , моль/год.	20000,00
Витрата тритію в очищеній воді G_{T2} , моль/год.	0,02755
Концентрація тритію у вихідному потоці РК2, x_{T4} % атм.	$6 \cdot 10^{-3}$
Концентрація тритію в потоці на вході РК3, x_{T11} % атм.	5,00
Концентрація тритію в потоці на виході з РК3, x_{T12} % атм.	1,00

1 Кі дорівнює $3,44 \cdot 10^{-5}$ моль T_2

Визначення витрат системи

Розрахунок параметрів вузлів та точок системи проводиться згідно з рис.1.7.

Витрата продукційного потоку колони РК3 G_{13} , моль/година точка №13:

Рівняння складу суміші:

$$G_{13} = G_{T13} + G_{D13} \quad (2.17)$$

де G_{T13} – витрата тритію, моль / год;

G_{D13} – витрата дейтерію, моль / год.

$$G_{13} = G_{T13} \cdot \frac{100}{99,9} = 0,2002 \quad (2.18)$$

Витрата очищеної важкої води G_2 , моль/година точка №2:

Рівняння матеріального балансу установки:

$$G_2 = G_1 - G_{13} = 19999,7998 \quad (2.19)$$

де G_I – витрата суміші на вході в установку, моль / год.

Витрата тритію, що виходить з електролізера G_{T3} , моль/година точка №3:

Рівняння матеріального балансу установки:

$$G_{T3} = G_{T4} + G_{T13} = 0,2275 \quad (2.20)$$

де G_4 – витрата суміші на виході з криогенного блоку, моль / год.

Витрата загальна в точці №4 G_4 , моль/година:

$$G_4 = \frac{G_{T4}}{x_{T4}} = 454,486 \quad (2.21)$$

Витрата загальна, потоку з електролізера G_3 , моль/година точка №3:

$$G_3 = G_4 + G_{13} = 454,486 \quad (2.22)$$

Концентрація тритію у точці №3 x_{T3} , % атм.:

$$x_{T3} = \frac{G_4 \cdot x_{T4} + G_{13} \cdot x_{T13}}{G_3} = 5,007 \cdot 10^{-4} \quad (2.23)$$

Витрата дейтерію G_{D3} , моль/година точка №3:

Рівняння матеріального балансу:

$$G_{D3} = G_3 - G_{T13} = 454,877 \quad (2.24)$$

Витрата загальна, що повертається в КІО G_4 , моль/година точка №4:

Рівняння матеріального балансу:

$$G_4 = G_3 - G_{13} = 454,905 \quad (2.25)$$

Витрата тритію, що подається на установку G_{T1} , моль/година точка №1:

Рівняння матеріального балансу установки:

$$G_{T1} = G_{T2} + G_{T13} = 0,2275524 \quad (2.26)$$

Концентрація тритію у точці №4 x_{T4} , % атм.:

$$x_{T4} = \frac{G_{T4}}{G_4} = 0,00606 \quad (2.27)$$

Витрата загального потоку колони РК3 G_{I2} , моль/година точка №12:

Рівняння матеріального балансу по висококиплячому компоненту:

$$G_{I2} = \frac{G_4 - G_3 + G_{I3} \cdot \frac{x_{T13}}{x_{T11}}}{1 - \frac{x_{T12}}{x_{T11}}} = 4,75 \quad (2.28)$$

Витрата тритію і дейтерію, що подається в колону РК2: G_{T12} , G_{D12} , моль/година точка №1:

Рівняння матеріального балансу:

$$G_{T12} = x_{T12} \cdot G_{I2} = 0,0475 \quad (2.29)$$

$$G_{D12} = G_{I2} - G_{T12} = 4,70225 \quad (2.30)$$

Витрата тритію G_{T11} , моль/година точка №11:

Рівняння матеріального балансу:

$$G_{T11} = G_{T12} + G_{T13} = 0,2475 \quad (2.31)$$

Витрата загальна на РК3 G_{I1} , моль/година точка №11:

Рівняння матеріального балансу:

$$G_{I1} = G_{I3} + G_{I2} = 4,94995 \quad (2.32)$$

Витрата дейтерію G_{D11} , моль/година точка №11:

Рівняння матеріального балансу:

$$G_{D11} = G_{I1} - G_{T11} = 4,702 \quad (2.33)$$

Коефіцієнт вилучення тритію для всієї установки:

$$\beta = \frac{G_{13} \cdot x_{T13}}{G_1 \cdot x_{T1}} = 0,88 \quad (2.34)$$

2.4. Розрахунок процесу ректифікаційних колон

Усі розрахунки у цьому підрозділі проводяться методом Понсона – Бошняковича. Він є графічний розрахунок по діаграмі $i - x, y$. Сам розрахунок зроблено на основі діаграм $i - x, y$ бінарної суміші, одержаних у програмі Mathcad за допомогою ініціалізаційного модуля програми Refprop.

Схема двосекційних колон РК2 та РК3 представлена на рис.1.7. Усі необхідні дані для розрахунку процесу ректифікації отримано раніше.

1. У колоні РК3 поділяється двокомпонентна суміш $D_2 + T_2$ з концентраціями (% , мол.): на вході – 95,0/5,0; укріплююча секція – 99,0/1,0; відгінна секція – 0,1/99,9 відповідно.

2. У колоні РК2 поділяється двокомпонентна суміш $D_2 + DT$ з концентраціями (% , мол.): на вході – 99,89/0,11; укріплююча – 99,98/0,02; відгінна – 90,0/10,0 відповідно. Потік вхідної суміші в даному розрахунку є змішання двох потоків (другий - це потік, відповідний точці №12 з колони РК3 - 98,0/2,0).

Розрахунок колони РК3. Режим №1

Наведена концентрація відповідає концентраціям вихідних продукційних потоків у верхній секції та нижній секції:

$$\xi_n = 0,001$$

$$\xi_b = 0,99$$

Графічно знаходимо мінімальне флегмове відношення, і через нього мінімальне флегмове число.

Так як двосекційна колона на діаграмі колони буде два полюси. Другий полюс (Π_2) знаходиться на перетині полюсного променя з першого полюса (Π_1)

та концентрації низькокиплячого компонента, одержуваного в нижній секції.

Відношення відстаней по осях координат від полюса ректифікації до точок перетину полюсного променя з рівноважними кривими пари та рідини обернено пропорційно відношенню кількості пари та рідини:

$$F_{\epsilon \min} = \frac{\Pi_{\min \epsilon} \cdot A_{\Pi}}{\Pi_{\min \mu} \cdot A_{\mathcal{K}}} = \frac{493,53}{814,7} = 0,606$$

$$f_{\epsilon \min} = \frac{F_{\epsilon \min}}{1 - F_{\epsilon \min}} = 1,537 \quad (2.35)$$

Через коефіцієнт запасу, що призначається, знаходимо дійсне флегмове число і відношення (колона працює при 0,15 МПа):

$$f_{\epsilon} = f_{\epsilon \min} \cdot 1,305 = 2,005$$

$$F_{\epsilon} = \frac{f_{\epsilon}}{1 + f_{\epsilon}} = 0,667 \quad (2.36)$$

Через трикутники подібності $\Pi_{\min \nu}$ A_{Π} A_1 та $\Pi_{\min \nu}$ $A_{\mathcal{K}}$ A_2 (рис.2.4) знаходимо дійсний полюс:

$$A_1 A_{\Pi} = F_{\epsilon} \cdot A_2 A_{\mathcal{K}} = 0,667 \cdot 20,851 = 13,913 \quad (2.37)$$

Число теоретичних тарілок, шт:

$$N_{\text{т}} = 52 + 23 = 75 \quad (2.38)$$

Знаходимо питоме навантаження графічно, Дж/моль:

$$q_{\text{кон}} = 645,1 \cdot 4 = 2581$$

$$q_{\text{вип}} = 22899,8 \cdot 4 = 91600 \quad (2.39)$$

Повне навантаження на конденсатор та випарник, Вт:

$$Q_{\text{конз}} = q_{\text{кон}} \cdot G_{12} = 3,4$$

$$Q_{\text{вин3}} = q_{\text{вин}} \cdot G_{13} = 5,1 \quad (2.40)$$

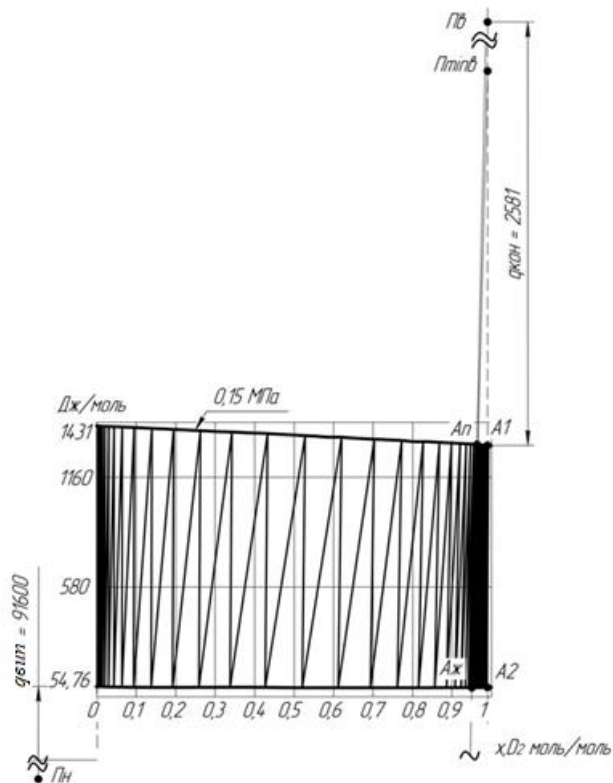


Рис. 2.4 Діаграма і - х, у

Тим самим способом зроблено розрахунок процесу ректифікації колони РКЗ при різних флегмових числах рис.2.5. Результат розрахунків представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри колони при різних флегмових числах

Параметри розрахунку	Флегмове число, f_v			
	4	6	10	20
F_v	0,8	0,86	0,91	0,95
N_{TT} , шт	45	32	32	31
$q_{\text{кон}}$, Дж/моль	5141,0	7710,0	13050,0	25700,0
$Q_{\text{вин}}$, Дж/моль	152300,0	213300,0	340000,0	640200,0
$Q_{\text{кон}}$, Вт	6,8	10,2	17,2	35,6
$Q_{\text{вин}}$, Вт	8,5	11,8	18,9	33,9

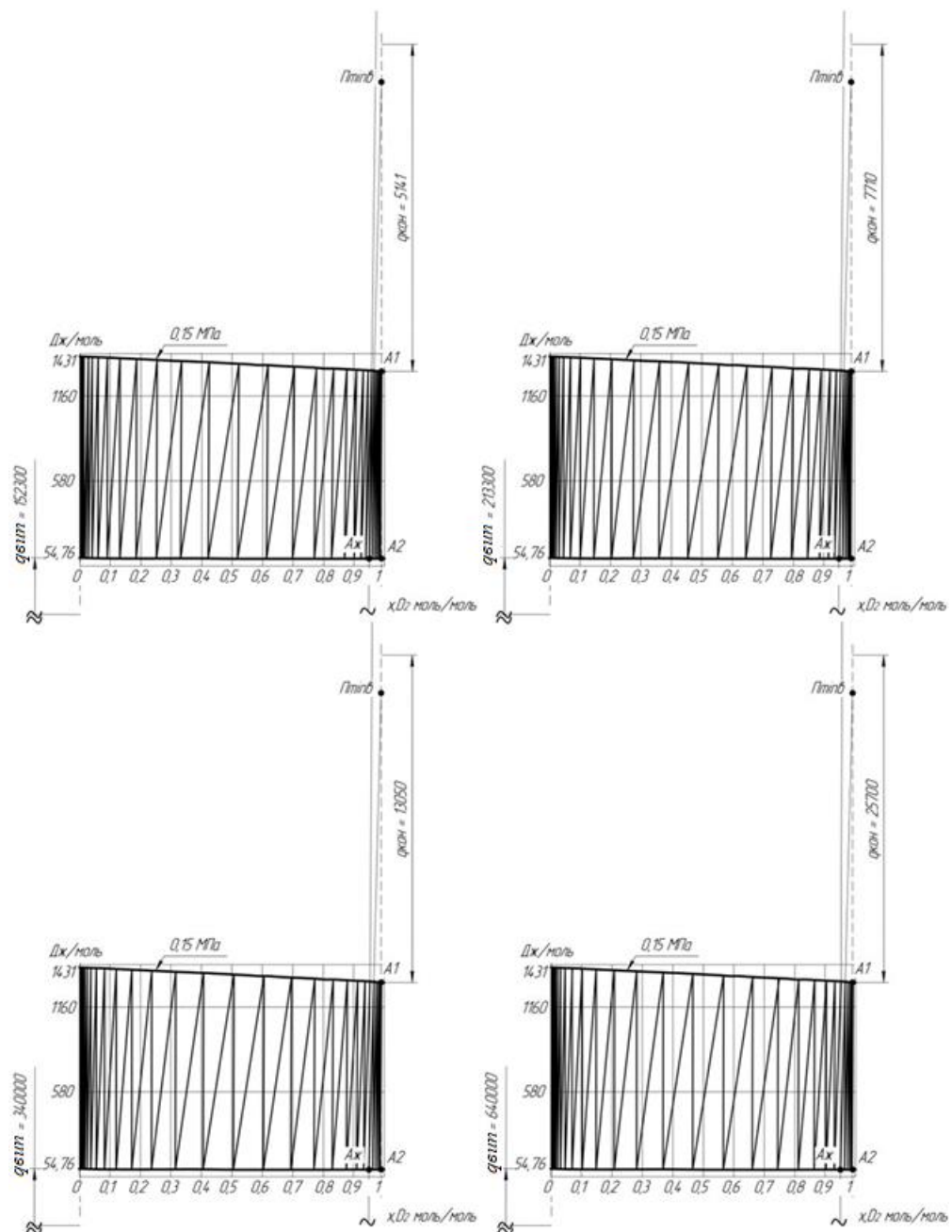


Рис.2.5 Діаграми розрахунку процесу ректифікації
для РКЗ у координатах: $i - x, y$

Вибір робочого флегмового числа

Зі збільшенням флегмового числа, число теоретичних тарілок зменшується, але це веде до зростання витрати теплоти (пари, що гріє) на проведення ректифікації та охолоджуючої води. Тобто зі збільшенням флегмового числа збільшується і щільність зрошення колони, а це часто призводить до зниження допустимої швидкості пари в колоні і, отже, до зростання її діаметра. Останнє тягне у себе збільшення обсягу колони. Зростання флегмового числа призводить, крім того, до зростання поверхні теплообміну окропу та дефлегматора. Усе це зумовлює збільшення капітальних вкладень. Таким чином, крива на рис.2.6, відображає сумарні витрати на проведення ректифікації, має мінімум, який визначає оптимальне флегмове число.

Для спрощення вибір оптимального флегмового числа проведено за такою методикою. Задаючись рядом значень флегмового числа, будують графічну залежність $N(f+1)$ від робочого f . Величина N пропорційна висоті колони, а $(f+1)$ пропорційно витраті пари, що виходить з колони. Добуток цих величин дозволяє оцінити обсяг колони.

Таким чином, величина $N(f+1)$, характеризує як експлуатаційні витрати, і капітальні вкладення. Визначимо оптимальне флегмове число у рекомендований спосіб.

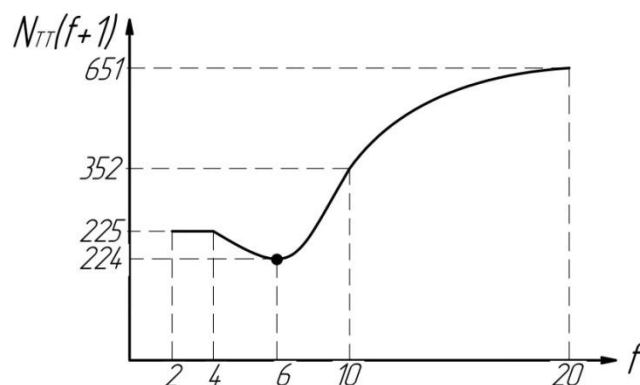


Рис. 2.6 До вибору оптимального флегмового числа

На основі проведеного аналізу про зміну числа теоретичних ступенів поділу зі збільшенням флегмового числа мінімальне флегмове число для колони РКЗ дорівнює 6.

Розрахунок колони РКЗ. Режим №2.

При доборі рефрижераторного циклу як холодоагент розглядатиметься неон. Для його застосування необхідно змінити та розрахувати режим роботи колони.

Розрахунок процесу ректифікації колони РКЗ при тиску: 0,67 МПа

$$F_{\epsilon \min} = \frac{\Pi_{\min \epsilon} \cdot A_{\Pi}}{\Pi_{\min H} \cdot A_{Ж}} = \frac{672,5}{1026,3} = 0,655$$

$$f_{\epsilon \min} = \frac{F_{\epsilon \min}}{1 - F_{\epsilon \min}} = 1,9$$
(2.41)

Через призначений коефіцієнт запасу знаходимо дійсне флегмове число та відношення:

$$f_{\epsilon} = f_{\epsilon \min} \cdot 3,2 = 6,08$$

$$F_{\epsilon} = \frac{f_{\epsilon}}{1 + f_{\epsilon}} = 0,859$$
(2.42)

Через трикутники подібності $\Pi_{\min \epsilon} A_{\Pi} A_1$ та $\Pi_{\min \epsilon} A_{Ж} A_2$ (рис.2.7) знаходимо дійсний полюс:

$$A_1 A_{\Pi} = F_{\epsilon} \cdot A_2 A_{Ж} = 0,859 \cdot 24,6 = 21,126$$
(2.43)

Число теоретичних тарілок, шт: $N_{TT} = 48$

Знаходимо питоме навантаження графічно, Дж/моль:

$$q_{\text{кон}} = 2154 \cdot 3,1 = 6748$$

$$q_{\text{вип}} = 59589,6 \cdot 3,1 = 186600$$
(2.44)

Повне навантаження на конденсатор та випарник, Вт:

$$Q_{\text{конз}} = q_{\text{кон}} \cdot G_{12} = 10,4$$

$$Q_{\text{винз}} = q_{\text{вин}} \cdot G_{13} = 8,9 \quad (2.45)$$

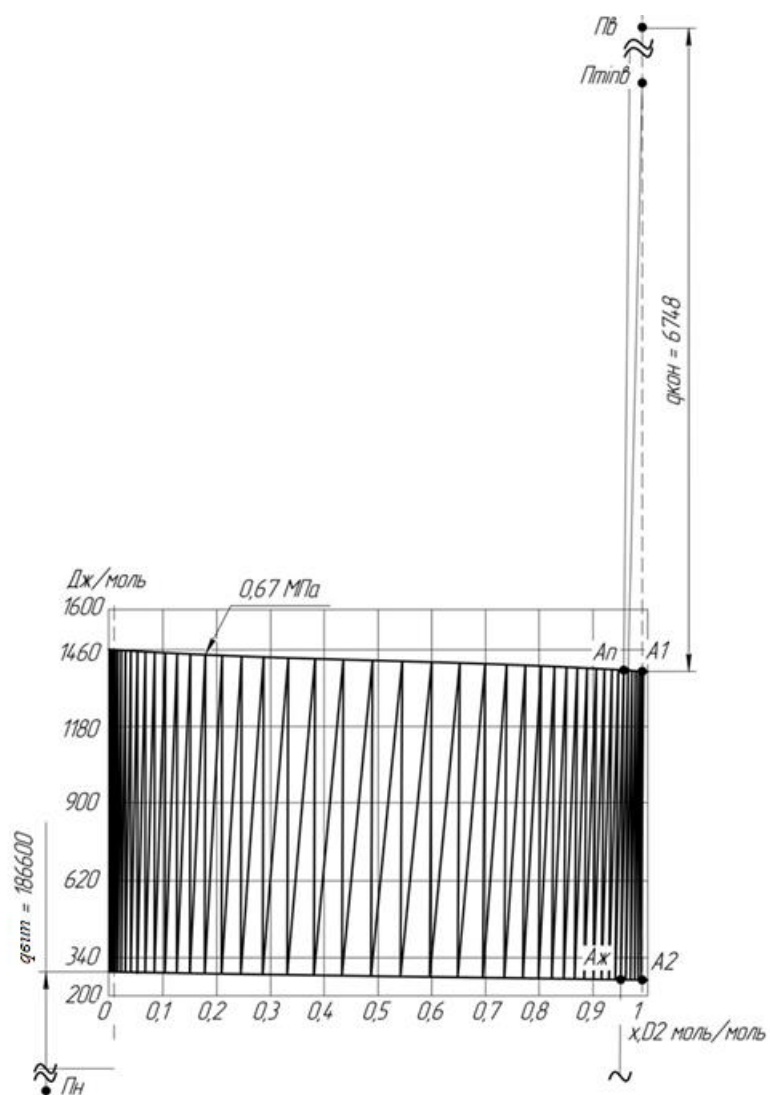


Рис. 2.7 Діаграма і - х, у

Розрахунок колони РК2. Режим №1

Наведена концентрація відповідає концентраціям вихідних продукційних потоків у верхній секції та нижній секції:

$$\xi_n = 0,9$$

$$\xi_g = 0,9988$$

Графічно знаходимо мінімальне флегмове відношення, і через нього мінімальне флегмове число. Аналогічно попереднім розрахункам.

$$F_{g \min} = \frac{\Pi_{\min g} \cdot A_{\Pi}}{\Pi_{\min n} \cdot A_{\text{Ж}}} = \frac{163,27}{247,21} = 0,66$$
$$f_{g \min} = \frac{F_{g \min}}{1 - F_{g \min}} = 1,945 \quad (2.46)$$

Через коефіцієнт запасу, що призначається, знаходимо дійсне флегмове число і відношення (колона працює при 0,23 МПа):

$$f_g = f_{g \min} \cdot 1,2 = 2,3$$
$$F_g = \frac{f_g}{1 + f_g} = 0,7 \quad (2.47)$$

Через трикутники подібності $\Pi_{\min B}$ A_{Π} A_1 та $\Pi_{\min B}$ $A_{\text{Ж}}$ A_2 (рис.2.8) знаходимо дійсний полюс:

$$A_2 A_{\text{Ж}} = \frac{A_1 A_{\Pi}}{F_g} = \frac{0,1657}{0,7} = 0,236 \quad (2.48)$$

Число теоретичних тарілок, шт: $N_{TT} = 51$

Знаходимо питоме навантаження графічно, Дж/моль:

$$q_{\text{кон}} = 196,18 \cdot 14,93 = 2929$$
$$q_{\text{вин}} = 17884 \cdot 14,93 = 267000 \quad (2.49)$$

Повне навантаження на конденсатор та випарник, Вт:

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		63

$$Q_{\text{gun2}} = q_{\text{gun}} \cdot G_{10} = 367,1 \quad (2.50)$$

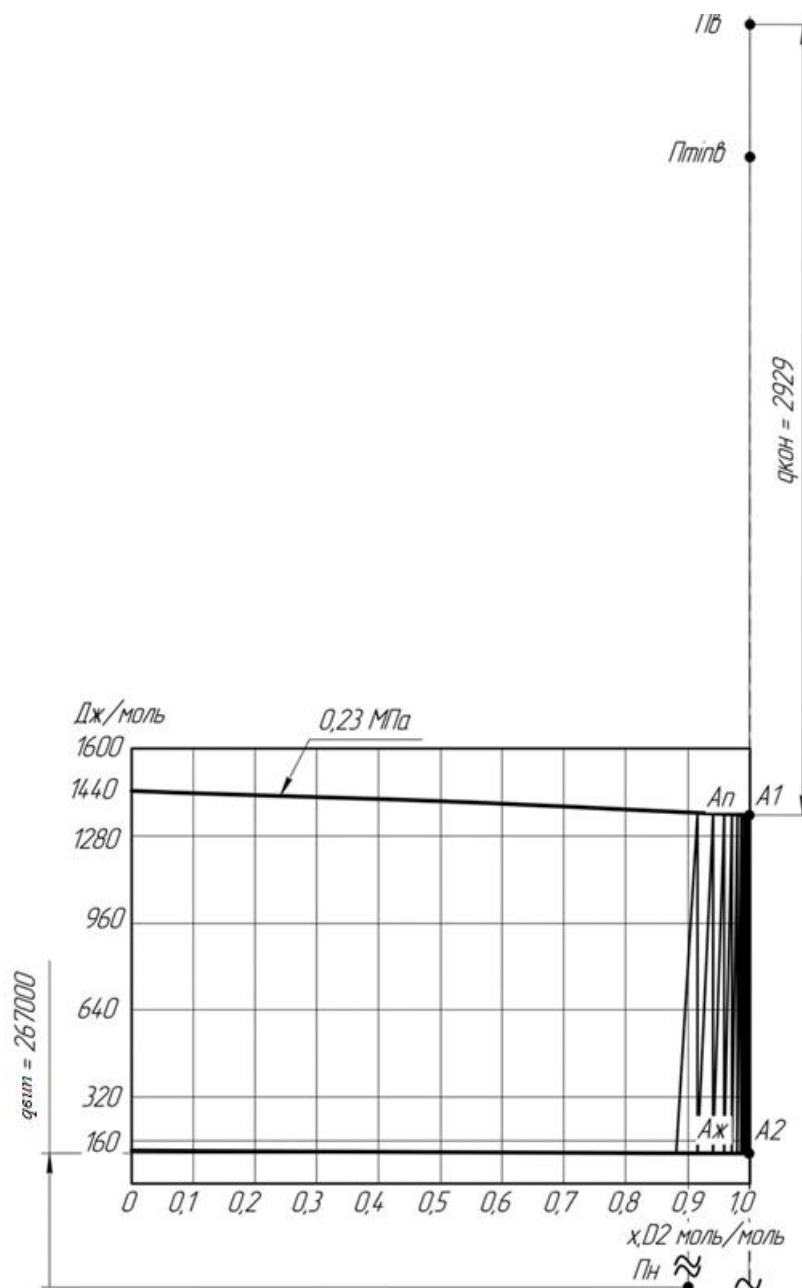


Рис. 2.8. Діаграма і - х, у

Тим самим способом зроблено розрахунок процесу ректифікації колони РК2 при різних флегмових числах рис.2.9. Результат розрахунків представлений Таблиці 2.2.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист
						64
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		

Таблиця 2.2 – Параметри колони за різних флегмових числах

Параметри розрахунку	Флегмове число, f_e				
	2	4	6	10	20
F_B	0,7	0,8	0,86	0,91	0,95
N_{TT} , шт	51	32	22	17	16
$q_{кон}$, Дж/моль	196,2	343,5	516,5	1926,2	2130,0
$Q_{вип}$, Дж/моль	17884,0	31377,9	47228,0	173579,6	206500,0
$Q_{кон}$, Вт	369,6	647,1	973,0	3630,0	4120,0
$Q_{вип}$, Вт	367,1	644,1	971,0	3628,0	4122,0

Графічне виконання розрахунку подано на рис. 2.9.

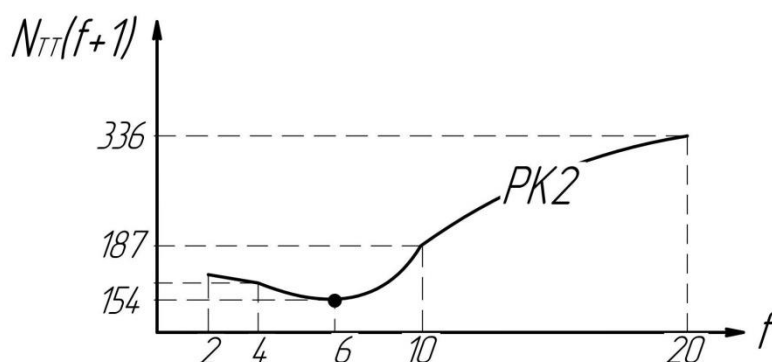


Рис. 2.9 До вибору оптимального флегмового числа

На основі проведеного аналізу про зміну числа теоретичних ступенів поділу зі збільшенням флегмового числа мінімальне флегмове число для колонки РК2 дорівнює 6.

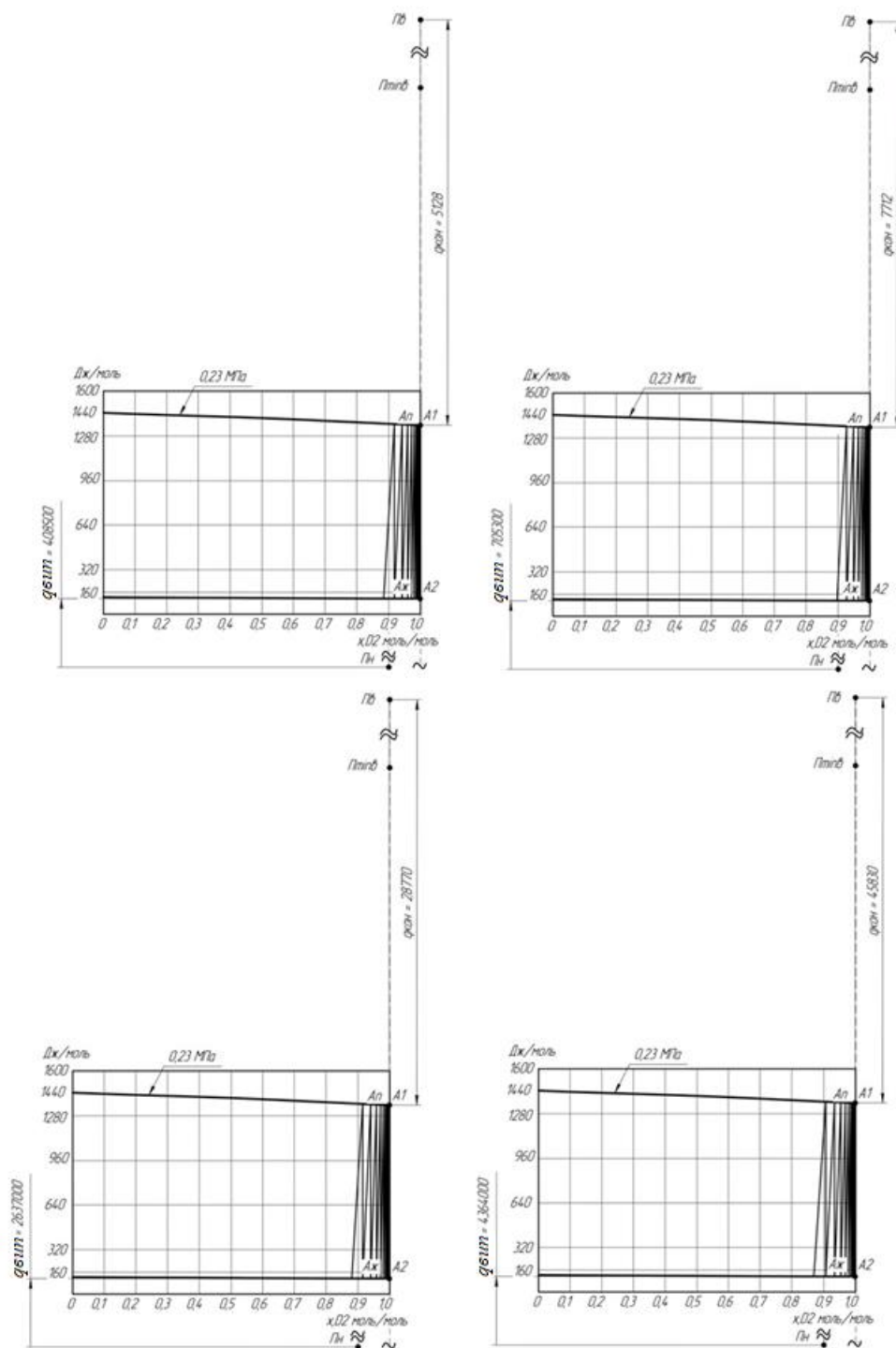


Рис.2.8 Діаграми розрахунку процесу ректифікації

Розрахунок колони РК2. Режим №2

Розрахунок процесу ректифікації колони РК2 при тиску: 0,67 МПа

$$F_{\epsilon \min} = \frac{\Pi_{\min \epsilon} \cdot A_{\Pi}}{\Pi_{\min H} \cdot A_{Ж}} = \frac{389,35}{471,23} = 0,826$$
$$f_{\epsilon \min} = \frac{F_{\epsilon \min}}{1 - F_{\epsilon \min}} = 4,75 \quad (2.51)$$

Через призначений коефіцієнт запасу знаходимо дійсне флегмове число та відношення:

$$f_{\epsilon} = f_{\epsilon \min} \cdot 1,3 = 6,1$$
$$F_{\epsilon} = \frac{f_{\epsilon}}{1 + f_{\epsilon}} = 0,861 \quad (2.52)$$

Через трикутники подібності $\Pi_{\min \epsilon} A_{\Pi} A_1$ та $\Pi_{\min \epsilon} A_{Ж} A_2$ (рис. 2.10.) знаходимо дійсний полюс:

$$A_2 A_{Ж} = \frac{A_1 A_{\Pi}}{F_{\epsilon}} = \frac{0,1656}{0,861} = 0,192 \quad (2.53)$$

Число теоретичних тарілок, шт: $N_{TT} = 69$

Знаходимо питоме навантаження графічно, Дж/моль:

$$q_{\text{кон}} = 505,9 \cdot 12,79 = 6471$$
$$q_{\text{вип}} = 46261 \cdot 12,79 = 591700 \quad (2.54)$$

Повне навантаження на конденсатор та випарник, Вт:

$$Q_{\text{кон}2} = q_{\text{кон}} \cdot G_4 = 816,6$$
$$Q_{\text{вип}2} = q_{\text{вип}} \cdot G_{10} = 813,5 \quad (2.55)$$

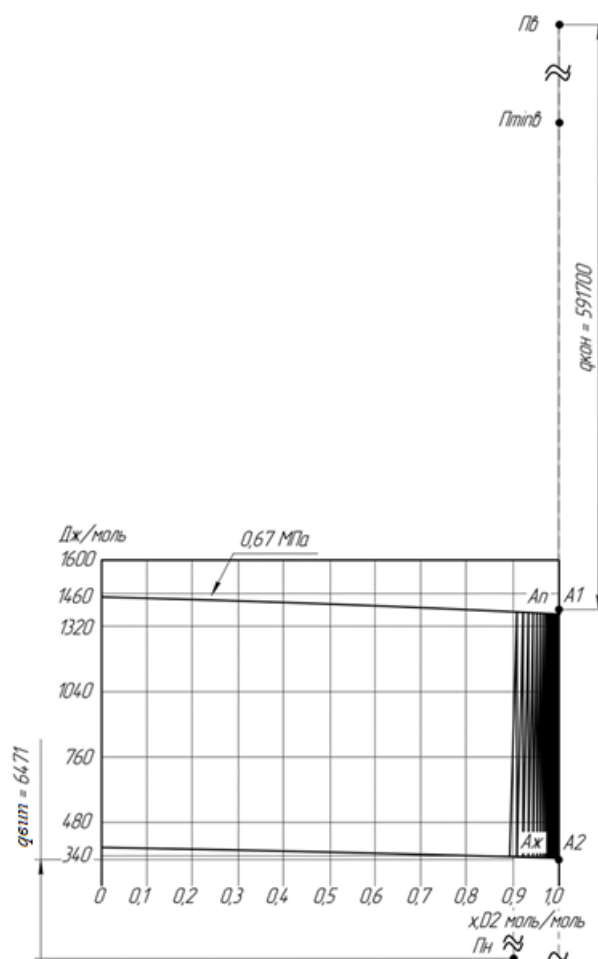


Рис. 2.10 Діаграма і - х, у

Результати розрахунків колон представлені у таблиці 2.3 і результати розрахунку технологічної схеми представлені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.3 - Параметри розрахунку режимів колон.

	Режим роботи колон РК2/РК3 (0,23/0,15МПа)		Режим роботи колон РК2/РК3 (0,67/0,67МПа)	
	РК2	РК3	РК2	РК3
Q_K , кВт	973,0	11,8	816,0	10,3
Q_B , кВт	971,0	10,1	813,0	8,9
T_K , К	26,4	24,8	31,9	31,9
T_B , К	26,9	26,4	31,4	33,5

Таблиця 2.4 - Параметри точок технологічної схеми

Номер точки		1	2	3	3*
Gзаг, моль/год		20000,00	19999,80	454,49	454,49
G, моль/год	T	0,23	0,03	0,23	0,23
	D	19999,77	19999,77	454,26	454,26
X, % атм.	T	0,0011	0,0001	0,0050	0,0050
	D	99,9989	99,9999	99,9950	99,9950
P, МПа		0,20	0,20	0,15	0,50
T, К		300,0	340,0	300,0	300,0
Номер точки		4	5	6	6*
Gзаг, моль/год		454,29	454,49	454,49	454,49
G, моль/год	T	0,03	0,23	0,23	0,23
	D	454,26	454,26	454,26	454,26
X, % атм.	T	0,0061	0,0050	0,0050	0,0050
	D	99,9939	99,9950	99,9950	99,9950
P, МПа		0,23	0,40	0,35	0,25
T, К		300,0	300,0	200,0	77,0
Номер точки		7	8	9	10
Gзаг, моль/год		454,49	454,29	454,29	4,95
G, моль/год	T	0,23	0,03	0,03	0,25
	D	454,26	454,26	454,26	4,70
X, % атм.	T	0,0050	0,0061	0,0061	5,0000
	D	99,9950	99,9939	99,9939	95,0000
P, МПа		0,23	0,23	0,23	0,23
T, К		26,7	26,4	76,1	26,9
Номер точки		11	12	13	
Gзаг, моль/год		4,95	4,75	0,20	
G, моль/год	T	0,25	0,05	0,20	
	D	4,70	4,70	0,00	
X, % атм.	T	5,0000	0,0100	99,9000	
	D	95,0000	99,9900	0,1000	
P, МПа		0,15	0,15	0,15	
T, К		26,9	24,8	26,4	

3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Проектування та розрахунок ректифікаційної колони

У цьому розділі проводиться розрахунок та проектування насадкової колони безперервної ректифікації для поділу ізотопів водню.

Розрахунок матеріального балансу, числа теоретичних тарілок та тепловий розрахунок ректифікаційної установки виконано у попередніх розділах.

Ректифікація – це процес, заснований на різниці летючості складових компонентів суміші, тобто на різних температурах кипіння компонентів за однакового тиску. Ректифікація полягає у багаторазовому частковому випаровуванні рідини та конденсації парів. Процес здійснюється шляхом контакту потоків пари та рідини, що мають різну температуру, і проводиться зазвичай у колонних апаратах, що складаються з власне колони, де здійснюється протиточне контактування пари та рідини, та пристроїв, в яких відбувається випаровування рідини та конденсація пари – куба та дефлегматора.

Перевагою насадкових колон є низький гідравлічний опір, висока ефективність та широкий інтервал сталої роботи.

Насадкові апарати є вертикальними циліндричними колонами, заповненими твердою насадкою, призначеною для збільшення поверхні контакту газової і рідкої фаз. Насадка укладається на опорні решітки, що мають отвори або щілини для проходження газу та стоку рідини, яка досить рівномірно зрошує насадку за допомогою розподільника і стікає поверхнею насадкових тіл у вигляді тонкої плівки вниз. Рідина практично повністю відтісняється від місця введення пари до периферії колони на відстані, що дорівнює чотирьом – п'яти її діаметрам. Тому часто насадку в колону завантажують секціями висотою чотири - п'ять діаметрів, а між секціями встановлюють перерозподільники рідини, призначення яких полягає у напрямку рідини від периферії колони до її осі.

Рідина в колонці насадки тече по елементу насадки у вигляді тонкої плівки, тому поверхнею контакту фаз є в основному змочена поверхню насадки. Однак при перетіканні рідини з одного елемента насадки на інший плівка ріди-

ни руйнується і на елементі нижче утворюється нова плівка. При цьому частина рідини проходить на розташовані нижче шари насадки в ідеї струйок, крапель та бризок. Частина поверхні насадки, переважно у місцях зіткнення насадкових елементів друг з одним, буває змочена нерухомою (застійною) рідиною. У цьому полягає основна особливість перебігу рідини в насадкових колонах на відміну від плівкових, в яких плівковий перебіг рідини відбувається по всій висоті апарату.

Основними характеристиками насадки, що визначають її ефективність, є такі величини:

1. Висота еквівалентна теоретичного ступеня поділу (ВЕТС) h , м - висота, що дорівнює висоті ділянки колони, на якій при бінарній ректифікації досягається повна термодинамічна рівновага між парою і рідиною у потоках, що виходять з цієї ділянки.

2. Пропускна здатність L , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ – максимальне значення потоку рідини на одиницю перерізу колони (питомої навантаження, чи щільності зрошення), у якому зберігається плівковий режим руху рідини за насадкою. При подальшому збільшенні щільності зрошення відбувається інверсія фаз: рідина стає безперервною, а пара, що проходить вгору у вигляді одиночних бульбашок – дисперсною фазою. Щоб уникнути цього явища, що різко погіршує масообмін, робоче питоме навантаження зазвичай вибирають рівним близько 80% від пропускної здатності насадки. Пропускна здатність визначає діаметр колони і тому повинна мати якнайбільше значення.

3. (Питомий) гідравлічний опір Δp , $\text{Па}/\text{м}$ – падіння тиску на одиниці висоти насадкового шару, що визначається, з одного боку, питомим навантаженням, з другого – властивостями насадки. Гідравлічний опір будь-якої насадки зростає особливо сильно при наближенні питомого навантаження до максимального. Оскільки тиск (температура кипіння) у нижній частині колони буде тим вищим, чим вищий гідравлічний опір, останній має бути по можливості меншим.

4. Коефіцієнт масштабного переходу (КМП) - відносне збільшення ВЕТТ при збільшенні діаметра колони, пов'язане, як правило, з поперечною нерівномірністю в структурі потоків рідини та пари, що рухаються назустріч один одному. Оскільки теоретичний прогноз цієї величини у переважній більшості випадків виявляється незадовільним, вважають, що $KPM \approx 1$, визначений за даними лабораторних досліджень.

У зв'язку з тим, що суворий теоретичний розрахунок масообміну в насадкових колонах по розподілу ізотопів водню поки що неможливий, слід користуватися досвідченими даними ВЕТС. Наявні досвідчені дані відповідають умовам, прийнятим у проекті.

Вибір насадки

Для ректифікаційних колон діаметром більше 150 мм використовують регулярні насадки. Для проектованої колони вибрано наступну насадку:

Насадка Sulzer Mellapak 125Y. Випускає Швейцарська компанія Зульцер. Регулярна насадка, виготовлена з гофрованих смуг, Sulzer CY – типу з питомою поверхнею близько $800 \text{ м}^2/\text{м}^3$, призначена для поділу сумішей із близькими властивостями, успішно зарекомендувала себе у складі промислових установок із виробництва важкої води у Канаді. Насадка виготовляється з вертикальних смуг з сталеві нержавіючої сітки, розташованих паралельно на певній відстані один від одного, які з'єднуються між собою за допомогою точкового зварювання, а упаковка в блоки проводиться за рахунок жорсткого бандажа гладкими пластинами або пластинами з «пелюстками». Для даної насадки при зміні діаметра колони при однакових навантаженнях газу в порівняних умовах масообмінні характеристики процесу не залежать від діаметра.

Таблиця 3.1 – Характеристики насадки

Тип насадки	Питома площа поверхні a , м ² /м ³	Порізність e , м ³ /м ³	Еквівалентний діаметр d_e , мм	ВЕТТ експ. h , мм
Mellapak 125Y	125	97	31	150

Допоміжні вузли насадкових колон

Допоміжні вузли насадкових колон включають опорні ґрати, перерозподільники рідини, зрошувачі та газорозподільники.

1. *Опорні ґрати.* Насадку укладають на опорні ґрати. Вільний переріз цих пристроїв має по можливості наближатися до величини вільного об'єму насадки, а розміри отворів виключатиме провал насадкових тіл. Насадку часто укладають на решітки, виготовлені зі сталевих смуг і поставлені на ребро.

2. *Зрошувачі.* Ефективність тепло- та масообміну значною мірою залежить від рівномірності розподілу рідини в обсязі насадки. Це завдання вирішується застосуванням спеціальних зрошувачів, що розподіляють рідину по верхньому перерізу насадки, та використанням матеріалів (металевих сіток, армованої склотканини), що забезпечують розтікання рідини поверхнею насадки під дією капілярних сил. Зрошувачі поділяють на струменеві та розбризкуючі. До струменевих відносяться розподільні плити, жолоби, бризкалки, зрошувачі типу сегнерового колеса та інші, а до розбризкуючих - тарілчасті, відцентрові, що обертаються, та ін.

3. *Газорозподільники.* Рівномірність розподілу газу перерізу апарату залежить від способу його введення. При введенні осі апарату газ рухається переважно в центральній його частині, лише поступово заповнюючи весь перетин апарату. Наявність опорно – розподільних ґрат значно підвищує рівномірність руху газу в основному обсязі.

Для подальшого розрахунку термодинамічні властивості речовин взяті із програми Mathcad під час використання модуля програми Refprop.

Вихідні дані до розрахунку:

Продуктивність по вихідній суміші,	454,50
моль/година	
Вміст низькокиплячого компонента в мол. %:	
- у вихідній суміші	99,89
- у дистиляті	99,98
- у кубі	90,00
Навантаження на конденсатор, Вт	973,00
Навантаження на випарник, Вт	971,00
Робочий тиск колони, МПа	0,23
Температура в конденсаторі, К	26,4
Температура у випарнику, К	26,9
Витрата кубового залишку, моль/година	4,94
Витрата дистиляту, моль/година	454,3
Витрата дистиляту з колони РКЗ, моль/година	4,75

3.2. Гідравлічний розрахунок колони

Метою розрахунку є визначення діаметра та висоти колони, гідравлічного опору насадки.

Діаметр колони визначається методом наближення: попередній розрахунок - виходячи з виду процесу та геометричного фактора насадки; остаточний – з урахуванням типу матеріалу насадки.

Попередній розрахунковий діаметр колони D , м визначається допустимою швидкістю суцільної фази ω_0 (газу, пари або рідини), розрахованої на повний переріз колони. Допустима швидкість газу в свою чергу є функцією швидкості заглинування ω_3 .

Фізично механізм підвисання та захлинування може розглядатися як утворення на поверхні рідини, під впливом потоку газу, хвиль з амплітудою, достатньою для закриття каналів, якими рухається газ.

Експериментальні дослідження з визначення точки захлинування дозволили зробити такі висновки:

- Зі збільшенням щільності зрошення захлинування настає при нижчих швидкостях газу;
- При однакових щільностях зрошення швидкість газу, що відповідає захлинуванню, вище у більшій насадці;
- Підвищення в'язкості зрошуючої рідини та зменшення її густини призводить до зниження межі навантаження.

При проектуванні насадкових апаратів використовувати швидкість захлинування як робочу швидкість газу не доцільно. Це пов'язано з тим, що протягом процесу передачі впливає безліч зовнішніх факторів (коливання навантажень по газу та рідини, зміна складів матеріальних потоків, коливання робочого тиску в апараті та ін.), і це може призвести до захлину колони. Тому робочу швидкість газу вибирають трохи менше швидкості захлинування.

Швидкість газу в перерізі колони, що відповідає захлинуванню колони, з урахуванням виду процесу та геометричного фактора насадки визначається за рівнянням:

$$\omega_3 = K_1 \cdot \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_n} \right)^{0,5} \cdot \left[11 - K_2 \cdot (0,775 + 0,225 \cdot \mu_{ж}^{0,25}) \cdot \bar{L}^{0,5} \right] \quad (3.1)$$

де ω_3 - швидкість захлинування пари, м/с; $\mu_{ж}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с; $\bar{L}$ - масова витрата рідкої фази, кг/с; ρ_n і $\rho_{ж}$ - густина пари та рідини відповідно, кг/м³.

Тоді швидкість захлинування для верхньої та нижньої частини колони відповідно, м/с:

$$\omega_{\text{вз}} = 0,05 \cdot \left(\frac{156}{4,4} \right)^{0,5} \cdot \left[11 - 0,11 \cdot (0,775 + 0,225 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^{0,25}) \cdot (3,1 \cdot 10^{-3})^{0,5} \right] = 3,28$$

$$\omega_{\text{нз}} = 0,05 \cdot \left(\frac{162}{4,96} \right)^{0,5} \cdot \left[11 - 0,11 \cdot (0,775 + 0,225 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^{0,25}) \cdot (3,09 \cdot 10^{-3})^{0,5} \right] = 3,14$$
(3.2)

Тоді допустима швидкість у верхній та нижній частині колони дорівнює, *м/с*:

$$\omega_{\text{ов}} = 0,8 \cdot 3,28 = 2,6$$

$$\omega_{\text{он}} = 0,8 \cdot 3,14 = 2,5$$
(3.3)

Попередній розрахунковий діаметр колони складе, *м*:

$$D_{\text{в}} = \sqrt{\frac{V_0}{0,785 \cdot \omega_{\text{ов}}}} = \sqrt{\frac{6,59 \cdot 10^{-4}}{0,785 \cdot 2,62}} = 0,018$$

$$D_{\text{н}} = \sqrt{\frac{V_0}{0,785 \cdot \omega_{\text{он}}}} = \sqrt{\frac{6,57 \cdot 10^{-4}}{0,785 \cdot 2,51}} = 0,018$$
(3.4)

де V_0 - витрата суцільної фази, *м³/с*

Дійсний розрахунковий діаметр D_p , *м* визначають за розрахунковою швидкістю ω_p , яка є функцією максимально допустимої швидкості, *м/с*:

$$\omega_{\text{оmax}} = K_1 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{жс}}}{\rho_{\text{н}}} \right)^{0,5} \cdot \left[1 - K_2 \cdot (0,775 + 0,225 \cdot \mu_{\text{жс}}^{0,25}) \cdot \left(\frac{L}{0,785 \cdot D_{\text{в}}^2} \right)^{0,5} \right] =$$

$$= 0,05 \cdot \left(\frac{156}{4,4} \right)^{0,5} \cdot \left[1 - 0,11 \cdot (0,775 + 0,225 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^{0,25}) \cdot \left(\frac{3,1 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,018^2} \right)^{0,5} \right] =$$

$$= 0,185$$

$$\omega_{\text{о}} = 0,8 \cdot \omega_{\text{оmax}} = 0,148$$
(3.5)

де K_1, K_2 – експериментальні коефіцієнти.

Тоді діаметр колони, *м*:

$$D_k = \sqrt{\frac{V_0 \cdot 3,8}{0,785 \cdot \omega_{\partial s}}} = \sqrt{\frac{6,6 \cdot 10^{-4} \cdot 3,8}{0,785 \cdot 0,185 \cdot 0,8}} = 0,147 \quad (3.6)$$

Приймаю діаметр колони із стандартних діаметрів, 159 мм ГОСТ 9617 – 76.

Вільний переріз колони, м:

$$f_k = 0,785 \cdot D_k^2 = 0,02 \quad (3.7)$$

Об'ємна швидкість рідини, м/с

$$L_v = \frac{L}{f_k} = \frac{3,1 \cdot 10^{-3}}{0,02} = 0,156 \quad (3.8)$$

Швидкість газу в колоні, м/с:

$$\omega = \frac{G}{f_k} = \frac{3,6 \cdot 10^{-3}}{0,02} = 0,182 \quad (3.9)$$

Загальна висота насадки, м:

$$H_{нас} = N_{tt} \cdot h_{экв} = (13 + 9) \cdot 0,15 = 3,3 \quad (3.10)$$

де N_{tt} - число теоретичних тарілок, шт.

Теоретичною тарілкою називають одноразовий контакт взаємодіючих потоків, що завершується досягненням фазової рівноваги.

При проектуванні насадкових колон слід обмежувати висоту шару насадок та приймати наступні максимальні співвідношення висоти шару насадки та діаметра колони: від 5 до 8.

Гідравлічний опір насадкового апарату

Однією з важливих характеристик апарату є гідравлічний опір насадки, який залежить від режиму руху пари (газу). Для розрахунку необхідно визначити число Рейнольдса для нижньої та верхньої частини колони:

$$\begin{aligned} \text{Re}_e &= \frac{d_e \cdot \rho_{en} \cdot \omega}{\mu_n} = 16420 \\ \text{Re}_n &= d_e \frac{4 \cdot \rho_{nn} \cdot \omega}{\sigma \cdot \mu_n} = 18620 \end{aligned} \quad (3.11)$$

де μ_n - в'язкість пари.

Оскільки число $\text{Re}_n > 400$, то коефіцієнт тертя для насадки:

$$\begin{aligned} \lambda_e &= \frac{16,5}{(\text{Re}_e)^{0,2}} = 2,368 \\ \lambda_n &= \frac{16,5}{(\text{Re}_n)^{0,2}} = 19,594 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Гідравлічний опір шару сухої насадки заввишки 1 м, Па/м:

$$\begin{aligned} \Delta p_{сухв} &= \frac{\lambda_e}{d_e} \cdot \frac{\rho_{en}}{2} \cdot \omega^2 = 5,514 \\ \Delta p_{сухн} &= \frac{\lambda_n}{d_e} \cdot \frac{\rho_{nn}}{2} \cdot \omega^2 = 51,74 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Гідравлічний опір зрошуваної насадки зазвичай представляють у вигляді суми двох складових: опору сухої насадки та опору, обумовленого взаємодією потоків пари та рідини:

$$\Delta p = A_1 \cdot (\Delta p_{сухв} \cdot H_e + \Delta p_{сухн} \cdot H_n) \quad (3.14)$$

де A_1 - коефіцієнт, що показує у скільки разів опір зрошуваної насадки більше, ніж сухий. Його можна визначити з виразу:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 + C \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,405} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{жс}} \right)^{0,225} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_n} \right)^{0,0405} = \\ &= 1 + 3,5 \cdot \left(\frac{3,1 \cdot 10^{-3}}{3,6 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,405} \cdot \left(\frac{4,37}{156} \right)^{0,225} \cdot \left(\frac{10 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,0405} = 2,6 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Тоді загальний гідравлічний опір насадки складе, Pa :

$$\Delta p = A_1 \cdot (\Delta p_{сухв} \cdot H_v + \Delta p_{сухн} \cdot H_n) = 280,7 \quad (3.16)$$

3.3. Конструктивний розрахунок каркасу колони

Конструкційні матеріали для апаратури, що працює за низьких температур

Зниження температури помітно впливає на фізичні та механічні властивості конструкційних матеріалів, тому природно вимагає врахування специфічних вимог до матеріалів та особливостей роботи обладнання в області низьких температур, зокрема термічних напруг, що виникають при багаторазових охолодженнях та відігрівах обладнання.

Основним вибором матеріалів для виготовлення апаратури і конструкцій є їх механічні властивості, що характеризують здатність чинити опір деформуванню та руйнуванню під впливом різних навантажень.

Високолеговані аустенітні сталі типу 12X18H10T, 07X21Г7АН5, Мідь М1, Титановий сплав АТ2-2 незначне зниження ударної в'язкості за низьких температур. Сталі цієї групи використовуються як основні конструкційні матеріали для апаратури кріогенної техніки.

Властивості зварних швів зі зниженням температури змінюються, як правило, аналогічно до властивостей основного матеріалу. Поряд із зварюванням у виробках, призначених для роботи при низьких температурах, широко застосовується пайка. Сполуки, виконані як легкоплавкими (олов'яно – свинцевими), так і тугоплавкими (мідно – цинковими або срібними) припоями, досить добре працюють аж до гелієвих температур.

З неметалевих матеріалів успішно використовується за низьких температур фторопласт. Як прокладочний, теплоізолюючий та мало – фрикційний матеріал у кріогенних пристроях часто застосовують текстоліт та гетинакс.

Перспективним матеріалом для кріогенної техніки можуть бути склопластики, які знаходять все більше застосування як силова теплоізоляція для виго-

товлення опор, стрижнів фіксаторів у криогенних резервуарах, арматурі та інших виробках.

Розрахунок товщини обичайки

Труба: сталь 12Х18Н10Т діаметром 159 мм.

Виконавчу товщину циліндричної обичайки, що працює під внутрішнім тиском, розраховують за такою формулою:

Товщина стінки s , мм:

$$s = \frac{p \cdot D}{2\varphi \cdot [\sigma] - p} + c = \frac{0,23 \cdot 159}{2 \cdot 1,184 - 0,23} = 0,1 \text{ мм} + c \quad (3.17)$$

де φ - розрахунковий коефіцієнт міцності поздовжнього шва; $[\sigma]$ - допустима напруга, МПа; p - розрахунковий тиск, МПа; D - внутрішній діаметр корпусу апарату, мм; C - виправлення до товщини стінки, мм.

З урахуванням виправлення:

$$s_1 = 3 \text{ мм} \geq 0,1 \text{ мм} + c \quad (3.18)$$

Наведена формула справедлива за умови:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{4 - 3,9 \text{ мм}}{159 \text{ мм}} = 0,006 \leq 0,1 \quad (3.19)$$

Вибираю для колони трубу розміром 159х4,0 мм безшовна нержавіюча 12Х18Н10Т ГОСТ 9941 – 81.

Розрахунок товщини днища

1. Днище еліптичне відбортоване 159 - 4 мм ГОСТ 6533 - 78.

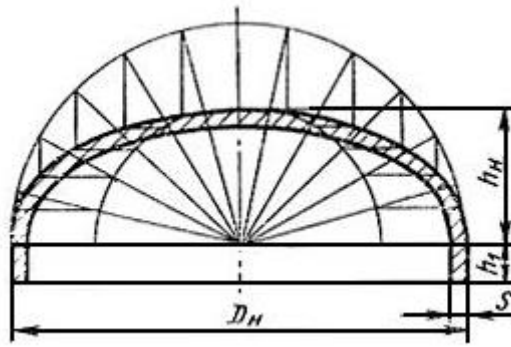


Рис.3.1 Днище еліптичне

Товщина стінки еліптичного днища, мм:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - 0,5p} + c = \frac{0,23 \text{ МПа} \cdot 159 \text{ мм}}{2 \cdot 168 \text{ МПа} - 0,5 \cdot 0,23 \text{ МПа}} = 0,12 \text{ мм} + c \quad (3.20)$$

Умови міцності виконуються за $s = 4 \text{ мм}$.

2. Днище конічне з тороїдальним переходом ГОСТ 14249-89

Товщина стінки з урахуванням виправлення:

$$s_1 = 3 \text{ мм} \geq 0,8 \text{ мм} + c \quad (3.21)$$

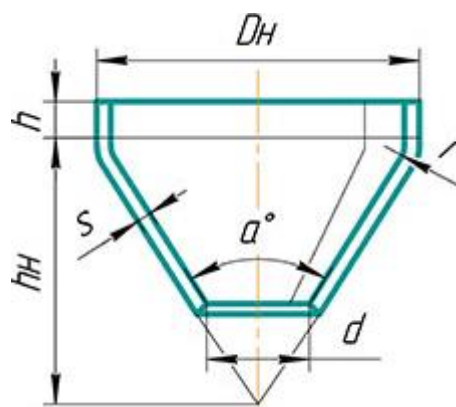


Рис. 3.2. Днище конічне

Розрахункова довжина перехідної частини обічайки:

$$a_1 = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha}} \cdot S = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{159_{\text{мм}}}{\cos 45^\circ}} \cdot 3_{\text{мм}} = 31_{\text{мм}} \quad (3.22)$$

Розрахункові формули застосовні при співвідношенні між товщиною стінки зовнішньої обичайки та діаметром у межах:

$$0,001 \leq \frac{S \cos \alpha}{D} \leq 0,05$$

$$0,001 \leq 0,004 \leq 0,05$$

Вузол введення сировини в колону

При подачі сировини в колону тільки в паровій фазі конструктивне виконання вузла введення не викликає особливих труднощів.

Введення пари в колону здійснюватиметься через спеціальний розподільник у вигляді трубного колектора. Він є продовженням вхідної трубки, на якій розташовані три вихідні патрубки зі спеціальною кришкою на виході. Кришки сконструйовані таким чином, щоб зменшити контакт флегми з верхньої насадки і пари, що подається.

Вузол відбору рідини

Відведення рідини найбільш просто можна здійснювати із заглибленого зливального пристрою.

Розрахуємо діаметр патрубка для виведення продукційного тритію:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot g_{T_2} \cdot M_{T_2}}{\rho_{T_2} \cdot \pi \cdot 3600 \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,2 \cdot 6}{253 \cdot \pi \cdot 3600 \cdot 1,5 \cdot 1000}} = 0,002 \quad (3.23)$$

де w – рекомендована швидкість рідини, м/с ; g_{T_2} – витрата продукційного тритію, моль/год ; M_{T_2} – мольна маса тритію, г/моль ; ρ_{T_2} – густина тритію при температурі виведення, кг/м^3 .

Розмір труби: 2х0,1 мм (ГОСТ 9941-81. Сталь нержавіюча).

3.4. Розрахунок допоміжних пристроїв колони

Для забезпечення високої ефективності застосування регулярної насадки необхідний ретельний розподіл по перерізу колони потоків рідини, що надходять, і газу.

Розподільні пристрої для рідини та пари

Найбільш часто застосовують такі конструкції розподільних пристроїв, що забезпечують гарний розподіл рідини по перерізу апаратів різного розміру: розподільні тарілки, жолоби, колектори та відцентрові пристрої.

Розподільні тарілки мають патрубки для проходу парів та ніпелі для стоку рідини. Для того, щоб пара проходила тільки через патрубки, їх роблять вище, ніж ніпелі, і зверху захищають від рідини, що стікає, козирками. Тарілки такого виду застосовують так само, як і перерозподільні тарілки, в колонах з тарілками провального типу та з насадкою.

При конструюванні розподільників кількість зрошувальних точок приймається відповідно до розрахунку або залежно від розмірів апарату.

Розрахуємо плиту, призначену для колон невеликого діаметра. У кожному комірці рідина підводиться розподільником типу «павук», а над патрубками плити, що виступають вгору, працюють за принципом кільцевого переливу, зазвичай встановлюють ковпачки, що створюють гідравлічний затвор, що перешкоджає проходу газу.

Число отворів, що забезпечують достатню змоченість головного зрошуваного перерізу насадки, шт:

$$N = \frac{4 \cdot Q}{\mu \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{\min} + \frac{\rho_{\text{жс}} - \rho_n}{\rho_{\text{жс}} \cdot g})}} \quad (3.24)$$

де Q - об'ємна витрата газу, м³/с; μ - коефіцієнт витрати; $H_{\min}$ - мінімальний гідравлічний напір над нижніми перерізами заповнених рідиною, мм; d_0 - внутрішній діаметр патрубку, мм.

За рекомендаціями виконаємо розрахунок кількості зрошувальних отворів на плиті:

$$N = \frac{4 \cdot 7,6 \cdot 10^{-4}}{0,7 \cdot \pi \cdot 0,006^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (0,075 + \frac{156 - 4,4}{156 \cdot g})}} \approx 24 \quad (3.25)$$

За ГОСТ 26-705-79 підібрано основні розміри решітки.

Опорні конструкції під насадку

Найбільш часто опорну конструкцію роблять у вигляді ґрат зі смуг, поставлених на ребро. Відстань між смугами має бути не більше ніж 0,7 від діаметра насадки. Для полегшення монтажу всі ґрати виготовляються з окремих секцій, що транспортуються через люки колони. Для колон невеликого діаметру гарною опорною конструкцією є решітка з просічно - витяжного гофрованого листа, сітки або смуг або лозин.

Насадка стоїть на колосникових ґратах. Такі ґрати повинні мати достатній прохідний переріз, бути міцними, маючи навантаження від сили тяжіння насадки та рідини, що стікає.

Конструкція та основні параметри підібрані за рекомендаціями відповідно до МН 4095-62-МН 4108-62.

3.5. Розрахунок теплообмінників колони

Всі необхідні дані для оцінного розрахунку були взяті з самих розрахунків колон. Всі теплообмінні апарати, що розраховуються, будуть виду змійовикових теплообмінників.

1. Визначення поверхні нагрівання куба колони та його розмірів

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист 84
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		

Поверхня нагрівання куба колони визначається з основного рівняння теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} \quad (3.26)$$

де Q - кількість тепла, що передається, Дж; k - коефіцієнт теплопередачі; Δt - середня різниця температур.

У колоні ректифікації безперервної дії температура кубової рідини залишається постійною, тому:

$$\Delta t = t_k - t_w^s \quad (3.27)$$

де t_w^s - температура кипіння кубової рідини.

В орієнтовному розрахунку задаємося коефіцієнтом тепловіддачі, тоді поверхня нагріву куба, m^2 :

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{971 Bm}{300 Bm / (m^2 \cdot K) \cdot (30 K)} = 0,1 \quad (3.28)$$

Довжина змійовикової труби, м:

$$l = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{0,1}{3,14 \cdot 0,01} = 3,18 \quad (3.29)$$

Визначимо кількість витків змійовикового теплообмінника:

$$n_e = \frac{l}{\pi \cdot D} = \frac{3,18}{3,14 \cdot 0,12} = 8,4 \quad (3.30)$$

де D - зовнішній діаметр змійовика, м; d - зовнішній діаметр трубки змійовика, м.

2. Визначення поверхні охолодження у конденсаторі колони

В орієнтовному розрахунку задаємося коефіцієнтом тепловіддачі, тоді поверхня охолодження конденсатора, m^2 :

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{973 Bm}{1000 Bm / (m^2 \cdot K) \cdot (0,95)} = 1,02 \quad (3.31)$$

Через велику площу поверхні конденсатора, пропоную зміювик, що складається з чотирьох рядів. Площа поверхні кожного ряду:

$$\begin{aligned} F_1 &= n_g \cdot \pi^2 \cdot D_1 \cdot d = 31 \cdot 3,14^2 \cdot 0,12 \cdot 0,01 = 0,36 \\ F_2 &= n_g \cdot \pi^2 \cdot D_2 \cdot d = 31 \cdot 3,14^2 \cdot 0,096 \cdot 0,01 = 0,3 \\ F_3 &= n_g \cdot \pi^2 \cdot D_3 \cdot d = 31 \cdot 3,14^2 \cdot 0,072 \cdot 0,01 = 0,22 \\ F_4 &= n_g \cdot \pi^2 \cdot D_4 \cdot d = 31 \cdot 3,14^2 \cdot 0,048 \cdot 0,01 = 0,14 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Висота зміювика становить 0,34 м, крок між трубками 1 мм, крок між рядами 2 мм.

3. Визначення розмірів теплообмінного апарату холодильного циклу перед входом потоку в конденсатор.

Теплообмінний апарат буде зміювик «труба в трубі» із заданими діаметрами труб.

- діаметр зовнішньої труби 20 мм;
- діаметр внутрішньої труби 10 мм.

В орієнтовному розрахунку задаємося коефіцієнтом тепловіддачі, тоді поверхня теплообміну, m^2 :

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{665,6 Bm}{500 Bm / (m^2 \cdot K) \cdot (6K)} = 0,22 \quad (3.33)$$

Довжина зміювикової труби, м:

$$l = \frac{F}{\pi \cdot d_{cp}} = \frac{0,22}{3,14 \cdot (0,02 + 0,01) \cdot 0,5} = 4,6 \quad (3.34)$$

Визначимо кількість витків змійовикового теплообмінника:

$$n_{\epsilon} = \frac{l}{\pi \cdot D} = \frac{3,18}{3,14 \cdot 0,24} = 6,1 \quad (3.35)$$

4. Визначення розмірів теплообмінного апарату основного циклу перед входом потоку на поділ у колону РК2.

Теплообмінний апарат буде змійовик «труба в трубі» із заданими діаметрами труб.

- діаметр зовнішньої труби 20 мм;
- діаметр внутрішньої труби 10 мм.

Середня різниця температур, К:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} = \frac{1 - 0,2}{2,3 \cdot \lg(1 / 0,2)} = 0,5 \quad (3.36)$$

В орієнтовному розрахунку задаємося коефіцієнтом тепловіддачі, тоді поверхня теплообміну, m^2 :

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{193,3 Bm}{500 Bm / (m^2 \cdot K) \cdot (0,5 K)} = 0,77 \quad (3.37)$$

Для зменшення гідровтрат потоків у зв'язку з великою величиною площі поверхні одна довга труба змійовика буде розділена на три труби із загальним колектором входу потоків.

Загальна довжина труби, м:

$$l = \frac{F}{\pi \cdot d_{cp}} = \frac{0,77}{3,14 \cdot (0,02 + 0,01) \cdot 0,5} = 16,3 \quad (3.38)$$

Визначимо кількість витків змійовикового теплообмінника:

$$n_{\epsilon} = \frac{l}{\pi \cdot D} = \frac{3,18}{3,14 \cdot 0,4} = 13,0 \quad (3.39)$$

3.6. Розрахунок ізоляції

Низькотемпературна ізоляція

Основні вимоги до теплоізолюючих матеріалів: мінімальний коефіцієнт теплопровідності, мінімальна гігроскопічність, відсутність взаємодії з матеріалом поверхні обладнання, біологічна інертність, доступність, низька вартість, зручність монтажу.

У кріогенній техніці застосовують в основному чотири способи теплоізоляції:

1. Газонаповнена або насипна;
2. Високовакуумна ізоляція;
3. Вакуумно-порошкова ізоляція;
4. Багатошарова екранно-вакуумна ізоляція.

Високовакуумна ізоляція

У вакуумі конвективний теплообмін усувається відкачуванням газу (при залишковому тиску менше 133 Па конвективний теплообмін практично відсутній)

Теплопровідність газів згідно з молекулярною – кінетичною теорією зменшується зі зниженням температури, головним чином за рахунок зниження середньої швидкості руху молекул. Зі зниженням тиску теплопровідність спочатку змінюється незначно, оскільки зменшення щільності компенсується зростанням довжини вільного пробігу молекул. Однак при досить малому залишковому тиску, коли довжина вільного пробігу стає більше відстані між стінками, подальша відкачування залишкового газу призводить до зниження теплопровідності. Таким чином, теплопровідність стає пропорційною тиску в області коли середня довжина пробігу молекул більша за відстань між стінками, оскільки зі зниженням тиску зменшується кількість молекул – переносників тепла. Тому

досить мала теплопровідність залишкового газу спостерігається лише за високому вакуумі. Практично залишковий тиск у теплоізолюючому просторі має бути меншим $(1-3) \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Для підтримки такого малого залишкового тиску необхідно використовувати досить потужну систему вакуумування при забезпеченні ретельної герметичності арматури. Ці вимоги слід вважати недоліком високовакуумної ізоляції.

У будь-якій тепловій ізоляції кріогенних систем теплоприплив складається з:

- теплоприплив за твердим скелетом ізоляції;
- теплопровідність газу;
- випромінювання.

Розрахуємо загальне перенесення теплоти у вакуумній багат шаровій ізоляції за рекомендаціями.

1. Теплоприплив від теплопровідності газу:

Кількість теплоти, що переноситься газом, знаходимо за формулою:

$$Q_z = \alpha_{npx} \cdot ((k+1)/(k-1)) \cdot (18,2 \cdot P / \sqrt{M \cdot T_T}) \cdot (T_T - T_X) \cdot F_X \quad (3.40)$$

де α_{npx} – наведений до холодної стінки коефіцієнт акумуляції, що враховує неповноту обміну енергій між молекулами та поверхнями; k – показник адіабати; M – молекулярна маса газу, $г/моль$; T_T – Температура теплої стінки, K ; T_X – температура теплої стінки, K ; F_X – площа холодної поверхні, $м^2$; P – тиск, $Па$.

За даними, зазначеними в літературі теплопровідність газу у вакуумі дорівнює, $Вт$:

$$Q_z = 0,8 \cdot ((1,4+1)/(1,4-1)) \cdot (18,2 \cdot 10^{-3} / \sqrt{29 \cdot 300}) \cdot (300 - 26,4) \cdot 1,998 = 0,512 \quad (3.41)$$

2. Кількість теплоти переноситься випромінюванням.

Потік променистої енергії від теплої поверхні до холодної в непоглинаючому і нерозсіюючому середовищі може бути визначений за формулою, отриманою з рівняння Стефана – Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot F_X \cdot ((T_T)^4 - (T_X)^4) \quad (3.42)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ - Наведена величина випромінювальної здатності тіла; σ - постійна випромінювання для абсолютно чорного тіла.

Наведена величина випромінювальної здатності поверхні розраховується за такою формулою:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{((1/\varepsilon_T) + F_T \cdot (1/\varepsilon_X - 1)/F_X)} \quad (3.43)$$

де ε_T - ступінь чорноти теплої поверхні; ε_X - ступінь чорноти холодної поверхні.

Визначимо потік променистої енергії $Q_{\text{л}}$, Вт:

$$Q_{\text{л}} = \frac{1}{((1/0,07) + 4,021 \cdot (1/0,03 - 1)/2,0)} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2,0 \cdot ((300)^4 - (26,4)^4) = 11,5 \quad (3.44)$$

Порахуємо теплоприплив при використанні екранів:

- оптимальна густина екранів: 7 екранів на 1 см;
- приймаю товщину ізоляції – 30 мм, це відповідає 21 екрану.

Обчислимо значення ступеня чорноти для N – екранів:

$$\varepsilon_{N_9} = \frac{1}{(N_9 \cdot 1/\varepsilon_9)} = \frac{1}{21 \cdot 1/0,018} = 8,5 \cdot 10^{-4} \quad (3.45)$$

де N_9 - кількість екранів; ε_9 - ступінь чорноти одного екрана.

Обчислимо коефіцієнт ефективності екранування:

$$\eta = \left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{N_9}}{\varepsilon_9} \right) \cdot \left(r_X \cdot \sum_1^{21} \frac{1}{r_X + (1/(n+1)) \cdot (r_T - r_X)} \right) \right)^{-1} =$$

$$= \left(1 + \left(\frac{8,5 \cdot 10^{-4}}{0,018} \right) \cdot \left(0,08 \cdot \sum_1^{21} \frac{1}{0,08 + (1/(n+1)) \cdot (0,16 - 0,08)} \right) \right)^{-1} = 0,44 \quad (3.46)$$

Тоді результуючий тепловий потік за допомогою випромінювання Q_9 ,
Вт:

$$Q_9 = \eta \cdot Q_n = 5,08 \quad (3.47)$$

3. Розрахуємо теплоприплив за твердим скелетом ізоляції, оскільки вакуумна багатошарова ізоляція складається з прокладок (склополотно ЕВТІ – 15, товщина 150 *мкм*) та екранів з алюмінієвої фольги, товщиною 14 *мкм*.

Розрахунок теплоприпливу ведуть за такою формулою:

$$Q = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\delta} \cdot (T_T - T_X) \cdot \sqrt{F_T \cdot F_X} \quad (3.48)$$

де $\lambda_{\text{эф}}$ - ефективний коефіцієнт теплопровідності.

Отже, теплоприплив по скелету ізоляції Q , *Вт*:

$$Q = \frac{1,2 \cdot 10^{-4}}{0,03} \cdot (300 - 26,4) \cdot \sqrt{4 \cdot 2} = 3,102 \quad (3.49)$$

Загальний теплоприплив до колони $Q_{\text{заг}}$, *Вт*:

$$Q_{\text{заг}} = Q_c + Q_9 + Q = 8,6 \quad (3.50)$$

ВИСНОВКИ

Доведено, що експлуатація промислових ядерних реакторів (особливо важководних типів CANDU) призводить до інтенсивного щорічного накопичення тритію в контурах теплоносія та модератора. Через високу дифузійну здатність та проникаючу спроможність тритію кріогенне ізотопне очищення є єдиним радикальним методом попередження його викидів у навколишнє середовище та захисту персоналу від внутрішнього радіаційного опромінення.

Продемонстровано високу точність та надійність методу Поншона–Бошняковича при розрахунку низькотемпературної ректифікації сумішей ізотопів водню. Інтеграція програмного комплексу Mathcad із базою даних термодинамічних властивостей Refprop дозволила коректно врахувати нелінійність фазової рівноваги бінарної системи D_2+T_2 за умов кріогенних температур (близько 24–27 K).

У результаті гідравлічного розрахунку насадкових колон визначено межі їх заклинування. Зафіксовано робочі швидкості потоків із технологічним запасом відносно критичних режимів, що гарантує стабільну та безаварійну роботу очисної установки при динамічних змінах витрат сировини з контуру реактора. Визначено точні геометричні характеристики апаратів.

На основі розрахунку складного радіаційно-кондуктивного теплообміну в кріогенному контурі обґрунтовано параметри захисного кожуха. Впровадження багатошарової екранно-вакуумної ізоляції (30 мм, 21 екран на основі склополотна ЕВТІ-15 та алюмінієвої фольги) дозволило мінімізувати результуючий тепловий потік із навколишнього середовища. Це суттєво зменшує енергетичні витрати на підтримання низькотемпературного режиму конденсаторів.

На основі аналізу кінетики авторадіолізу та накопичення гелію-3 визначено, що тривале зберігання вилученого тритію у газоподібному стані під тиском або у вигляді рідкої води супроводжується небезпечним зростанням тиску в ємностях. Обґрунтовано, що найбільш надійною та радіаційно безпечною матрицею для локалізації продукту є переведення його у тверду фазу гідриду титану, яка демонструє високу хімічну стійкість до поверхневого окиснення при кімнатних температурах.

					КРБ.КТ.1.613-03.1.11	Лист
						92
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Да-		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Архаров А.М. Кріогенні системи. Т.2 Основи проектування апаратів, установок та систем. - М: Машинобудування, 1999.
2. V. L. Bondarenko, Yu. M. Simonenko. Cryogenic Technologies of Rare Gases Extraction: monograph. — Odesa : Astroprint, 2014. — 312 p.
3. В. М. Арсеньєв, В. М. Козін. Кріогенна техніка: основи теорії і розрахунку циклів кріогенних установок: навч. посіб.. — Суми : СумДУ, 2021. — 272 с.
4. Б. Г. Грудка, А. М. Басов. Повітророздільні установки : конспект лекцій. — Одеса : ОНАХТ, 2022. — 57 с.
5. M. Kravchenko. Air separation units for cryogenic products : lecture notes. — Odesa : ONAFT, 2022. — 73 p.
6. Castle W. F. Air separation and liquefaction: Recent developments and prospects for the beginning of the new millennium // International Journal of Refrigeration. — 2002. — Vol. 25. — P. 158-172.
7. M. Kravchenko. Cryogenic technology and low-temperature machines : lecture notes. — Odesa : ONAFT, 2022. — 105 p.
8. Alsultanny Y. A., Al-Shammari N. N. Oxygen Specific Power Consumption Comparison for Air Separation Units // Engineering Journal. —2014. —Vol. 18 (2). — P. 68–80.
9. Harald Klein, Philipp Fritsch, Patrick Haider Flexible Operation of Air Separation Units // ChemBioEng Reviews. —2021. —Vol. 8. —P. 1-19.
10. Kumar, M., Panda, D., Behera, S. K. & Sahoo, R. K. Experimental investigation and performance prediction of a cryogenic turboexpander using artificial intelligence techniques. // Applied Thermal Engineering. —2019. —P.15-29.
11. Sam, A. A. & Ghosh, P. Flow field analysis of high-speed helium turboexpander for cryogenic refrigeration and liquefaction cycles. // Cryogenics. —2017. —Vol. 82. —P. 5-13.
12. Дем'яненко Ю.І. Охорона праці під час роботи на установках розділення повітря. Навчальний посібник. — 2006.