

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



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

На тему: «Дослідження системи кріогенного забезпечення з холодопродуктивністю 600Вт на температурному рівні 16 К»

Здобувач Корба Є.М.
(прізвище, ініціали)

2маг курсу КТ-262м групи

Керівник проф. Симоненко Ю.М.
(посада, прізвище та ініціали)

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

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 20____ р., протокол № _____

Завідувач кафедри КТ _____ **Юрій СИМОНЕНКО**

Одеса - 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ІНЖЕНЕРНОЇ МЕХАНІКИ

Кафедра Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма «Кріогенні технології виробництва,
зрідження і транспортування природного газу»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ

д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«__» ____ 2023 року

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

Корби Євгена Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження системи кріогенного забезпечення з
холодопродуктивністю 600Вт на температурному рівні 16 К

керівник роботи д.т.н., проф. Симоненко Юрій Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 30 жовтня 2023 року № 631-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 1 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Кріогенна гелієва установка для отримання
рідкого гелію

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Вступ. Літературний огляд. Постановка мети та завдань дослідження. Опис роботи
та технологічна схема КГУ. Розрахунок параметрів роботи КГУ у трьох режимах. Проектування
елементів зріджувача неону при роботі в якості зовнішнього навантаження КГУ.
Охорона праці. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:
Презентація Power Point (11 слайдів)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	д.т.н.,проф. Морозюк Л.І.		

7. Дата видачі завдання 01.11.2023

Керівник _____ д.т.н.,проф. Симоненко Ю.М.

Завдання прийняв до виконання _____ Корба Є.М.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	10 днів	
2	Огляд і аналіз літератури	20 днів	
3	Розробка технологічної моделі	5 днів	
4	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	28 днів	
5	Термодинамічні розрахунки елементів об'єкта	20 днів	
6	Розробка конструктивних моделей апаратів	10 днів	
7	Аналіз результатів досліджень	8 днів	
8	Оформлення пояснювальної записки	10 днів	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	8 днів	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	9 днів	

Здобувач-дипломник _____
(підпис)

Корба Є.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Симоненко Ю.М.
(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

Корба Є.М.
(ПІБ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кріогенні системи, призначені для отримання та використання низьких температур, стали важливим інструментом прогресу в різних галузях знань. Найбільш широко кріогенні зріджувальні системи застосовують для скраплення природного газу, кисню, азоту, водню, гелію. Установки цієї групи розрізняють за температурою конденсації, і особливо, за продуктивністю від декількох до десятків тисяч літрів на годину. У ході роботи проведені розрахунки циклу гелієвого зріджувача при роботі в режимі зрідження, при роботі в рефрижераторному режимі зі зміною температури виходу гелію від споживача, а також при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням в якості зовнішнього навантаження зріджувача неону. Виконано тепловий та гідравлічний розрахунок основного теплообмінника зріджувача неону, тепловий розрахунок конденсатора. Визначено частку зворотного потоку гелію, що спрямовується до основного теплообмінника зріджувача Ne.

Ключові слова: кріогенна гелієва установка, неон, гелій, зрідження, конденсатор, компресор.

ABSTRACT

Cryogenic systems designed to obtain and use low temperatures have become an important tool for progress in various fields of knowledge. Cryogenic liquefaction systems are most widely used for liquefaction of natural gas, oxygen, nitrogen, hydrogen, and helium. Installations of this group are distinguished by the temperature of condensation, and especially, by the productivity from several to tens of thousands of liters per hour. In the course of the work, the calculations of the helium liquefier cycle were carried out when working in the liquefaction mode, when working in the refrigerator mode with a change in the temperature of the helium output from the consumer, as well as when working in the refrigerator mode with the connection of the neon liquefier as an external load. The thermal and hydraulic calculation of the main heat exchanger of the neon liquefier, the thermal calculation of the condenser was performed. The proportion of the reverse flow of helium directed to the main heat exchanger of the Ne liquefier was determined.

Key words: cryogenic helium unit, neon, helium, liquefaction, condenser, compressor.

ЗМІСТ

1 Вступ	7
2 Огляд літератури	9
3 Розрахунок оптимальних параметрів циклу гелієвого зріджувача	16
3.1 Вихідні дані:	16
3.2 Принципова схема зріджувача гелію	17
3.3 Теплоприпливи з навколишнього середовища	18
3.4 Визначення температури гелію за детандером	19
3.5 Визначення матеріальних та теплових потоків	24
3.6 Визначення витрат електроенергії	39
4 Розрахунок оптимальних параметрів циклу гелієвого зріджувача при роботі в рефрижераторному режимі	42
4.1 Вихідні дані	42
4.2 Принципова схема зріджувача гелію при роботі в рефрижераторному режимі	43
4.3 Теплоприпливи з навколишнього середовища	44
4.4 Визначення температури гелію після детандеру	45
4.5 Визначення холодопродуктивності	46
4.6 Визначення витрат енергії	51
5 Розрахунок оптимальних параметрів циклу гелієвого зріджувача при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням зовнішнього навантаження (зріджувача неону)	54
5.1 Вихідні дані:	54
5.2 Принципова схема зріджувачу гелію при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням зовнішнього навантаження (зріджувачу неону)	55

					КРМ.КТ.2.631-03.1.16			
Змін.	Арку	№ документ.	Підпис	Дата	Дослідження системи криогенного забезпечення з холодопродуктивністю 600Вт на температурному рівні 16 К	Літ.	Аркуш	Листів
<i>Розроб.</i>		Корба Є.М.					5	123
<i>Перевір.</i>		Симоненко Ю.М.				КТ-262м		
<i>Рецензування</i>								
<i>Н. Контр.</i>		Симоненко Ю.М.						
<i>Затверджен</i>								

Процес отримання будь-якого інертного газу зазвичай складається із двох стадій: на першій - виділяють концентрат («сирий газ»); на другій - збагачують (рафінують) його до отримання чистого продукту. Попереднє очищення ведуть за допомогою процесів фракційної конденсації у місцях отримання суміші. У повітродільних установках гелій і неон не зріджуються, а накопичуються у верхній частині нижньої колони. Цю суміш необхідно виводити з апарату для забезпечення сприятливих умов тепловіддачі у конденсаторі. Зазвичай концентрація неонгелієвої суміші у згаданому потоці не перевищує 10% (об'ємних). Основну частину цього продукту займає азот.

Подальше підвищення концентрації Ne-He суміші здійснюють у спеціальних дефлегматорах у складі повітродільної установки.

Через технологічні обмеження (тиск всього 0,4-0,5 МПа і температура 80К) вони не здатні забезпечити вміст цінного продукту в концентраті більше 50%. Вимушене перевезення відносно бідної суміші до пунктів централізованої переробки супроводжується невиправданими транспортними витратами.

Подальше збагачення Ne-He суміші можна зробити лише в окремому апараті. Це дає можливість, не прив'язуючись до параметрів в установці повітря, встановити більш кращі умови дефлегмації. Вони досягаються за рахунок підвищення тиску вище 1,0 МПа і зниження температури до 66÷68К.

Подальше очищення концентрату перед поділом його на складові проводиться в адсорберному блоці на рівні температур 68÷78К. У якості сорбента використовують активоване вугілля СКТ-4, що отримується з торфу методом насичення сірчастим калієм. Охолодження до температур азоту, що кипить під вакуумом ($T < 77,4\text{K}$), підвищує поглинаючу здатність сорбенту.

Важливість низьких температур також велика у розвитку фізики, приладобудуванні, космонавтики, біології, медицини. Сформовано такі напрями як кріофізика, кріоенергетика, кріоелектроніка, кріобіологія та ін.

Всі ці напрями науки і техніки мають загальну основу, яка полягає у використанні кріогенних систем для вирішення найрізноманітніших завдань.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Відповідно до теми магістерської роботи було вивчено перелік літератури. У ході виконання роботи необхідно вивчити систему кріогенного забезпечення на температурному рівні 16 К з холодопродуктивністю 600 Вт, а також розробити конструкцію зріджувача неону. На зазначеному температурному рівні робочою речовиною може бути лише гелій. Інертний газ гелій – найбільш поширене робоче середовище у різних кріогенних системах.

Рідкий гелій є єдиним холодильним агентом для отримання низьких температур у районі останніх десяти градусів від абсолютного нуля. Добре відомі особливі фізичні властивості, які набувають тіла за таких низьких температур, - надпровідність, надплинність та ряд інших. Нині низькі температури зберігають не тільки науковий, а й починають набувати великий практичний інтерес, оскільки їх використовують у радіотехніці, електроніці та інших областях. Попит на гелієві зріджувачі зростає, і робота з рідким гелієм перестає бути надбанням окремих нечисленних інститутів. Тому розробка безпечних, простих у користуванні та ефективних зріджувальних циклів є важливим завданням технічної фізики. Такого поширення гелій отримав завдяки своїм фізичним властивостям, багато з яких унікальні.

Останніми роками намітилася тенденція скорочення використання великих гелієвих зріджувачів та систем. У той самий час значно зросла потреба у малогабаритних зріджувачах, які не потребують обслуговування великої кількості обслуговуючого персоналу. Найбільша потреба в малогабаритних транспортабельних гелієвих зріджувачах є у таких галузях як електронна промисловість, геологія, радіопромисловість...

Потреба в лабораторних зріджувачах лише для проведення різних досліджень матеріалів нині становить понад 20-30 штук на рік. Основні вимоги до таких зріджувачів – компактність, автономність роботи, висока ефективність, можливість роботи у робочому режимі, простота обслуговування.

					<i>KPM.KT.2.631-03.1.16</i>	<i>Лист</i>
<i>Ли</i>	<i>Зм.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дат</i>		9

Зріджувачі I групи, що працюють за дросельним циклом, в основному розрізняються кількістю рівнів попереднього охолодження, тобто кількістю ванн, встановлених на потоці гелію, де для охолодження використовується рідкий N_2 та рідкий H_2 . Зріджувачі цього типу відрізняються великою надійністю і простотою в обслуговуванні, але їх істотним недоліком є використання водню, що робить їх вибухонебезпечними.

Зріджувачі II групи відрізняються тим, що, для розширення частини стиснутого гелію використовується один детандер або здійснюється каскадне розширення гелію в двох детандерах, встановлених на різних температурних рівнях. Попереднє охолодження стиснутого гелію здійснюється за допомогою рідкого азоту. Деяке зменшення надійності у такій конструкції зріджувача порівняно зі зріджувачами I групи значною мірою компенсується їх вибухобезпекою.

Зріджувачі III групи характеризуються тим, що отримання необхідної холодопродуктивності здійснюється за рахунок каскадного розширення гелію в декількох детандерах. Конструктивні особливості таких зріджувачів, пов'язані з вибором необхідної кількості детандерів у циклі та визначенням оптимальних параметрів їх роботи. Відмінною рисою зріджувачів цього типу є відсутність будь-яких холодоагентів, що використовуються для попереднього охолодження. Безумовно наявність кількох детандерів в зріджувачі неминуче спричиняє значне ускладнення експлуатації такої установки та дещо знижує надійність її роботи.

Для порівняння ефективності циклів, що використовуються в зріджувачах розглянутих вище груп, можна скористатися даними роботи [17], де проводиться досить докладний аналіз кожного з циклів. На рисунку 2.1 представлені принципові схеми установок кожної групи циклів і дано зображення циклу в T,s-діаграмі. Результати цього аналізу представлені у таблиці 2.1.

Незважаючи на те, що зріджувачі I групи мають найбільшу величину питомого виходу зрідженого гелію, дані таблиці показують, що витрата енергії в цьому випадку є порівняно високою. Якщо для зріджувачів малої

продуктивності ця обставина не має вирішального значення, то для зріджувачів середньої та особливо великої продуктивності вона у ряді випадків стає вирішальною. На додаток до цього, як зазначалося вище, не завжди бажаним є використання водню у системі зріджувача з міркувань вибухобезпеки. З двох розглянутих детандерних циклів зрідження деяку перевагу має детандерний цикл з використанням рідкого N_2 для попереднього охолодження стисненого гелію. Хоча цей цикл дещо поступається каскадному детандерному циклу за величиною питомої витрати енергії, але перевершує його за надійністю, тому що в цьому випадку конструкція зріджувача виходить більш простою. При використанні цього циклу, як видно з таблиці 2.1, дещо більше значення має коефіцієнт зрідження в порівнянні з каскадним детандерним циклом. Враховуючи все вищевикладене для розрахункового зріджувача, вибираємо детандерний цикл зрідження з використанням рідкого азоту для охолодження попередньо стисненого гелію. Наведемо короткий опис принципової схеми установки (рисунок 2.1 б) [1].

Потік газоподібного гелію, що складається з гелію, що зріджується, гелію детандерного і дросельного циклів, стискається в поршневному компресорі I від тиску p_0 до p_k . Стиснутий гелій охолоджується в попередньому теплообміннику II до стану 3 і потім проходить ванну з рідким азотом III, що кипить під вакуумом, охолоджуючись до стану 4. Подальше охолодження стисненого гелію до стану 5 проводиться в теплообміннику IV. У точці відповідної стану 5, від потоку стисненого гелію відокремлюється потік гелію детандерного циклу, який надходить в детандер V, де розширюється до стану 10. Зріджувальний гелій і гелій дросельного циклу послідовно охолоджуються в теплообмінниках VI-VII, після чого дроселюються у збірник рідкого гелію процес 7-8. Суха насичена пара стану 9 являє собою потік гелію дросельного циклу, який охолоджує зріджувану частину гелію у теплообміннику VII, а надалі бере участь у регенеративному теплообміні у теплообмінниках VI, IV та II. Таким

чином, в даному випадку для зрідження гелію використовується дросельний цикл, з'єднаний з детандерним гелієвим циклом і циклом рідкого азоту.

У ході роботи необхідно розрахувати цикл гелієвого зріджувача при роботі в режимі зрідження, при роботі в рефрижераторному режимі зі зміною температури виходу гелію від споживача, а також при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням в якості зовнішнього навантаження неону.

Для дослідження системи кріогенного забезпечення на температурному рівні 16 К з продуктивністю 600 Вт, візьмемо модернізований варіант багаторежимної кріогенної гелієвої установки К.Г.У.-150/4.5 (рисунок 2.2) [18], К.Г.У.-600/15 -45 (рисунок 2.3). Установка К.Г.У.-600/15 в рефрижераторному режимі роботи здатна видавати 600 Вт на температурному рівні 15 К, а в зріджувальному до 45 літрів рідкого гелію.

В якості зовнішнього навантаження, що підключається до зріджувача гелію візьмемо зріджувач неону.

Неон є перспективною робочою речовиною для багатьох кріогенних систем і все ширше починає застосовуватись у низькотемпературній техніці [6]. У газоподібному та рідкому стані переваги неону видно особливо чітко при порівнянні його з воднем, до якого він найбільш близький за рівнем температур, що досягаються. Переваги неону як холодоагенту визначаються в першу чергу такими властивостями, як абсолютна безпека його використання, висока питома холодопродуктивність [6]. Неон – інертний газ, і це вигідно відрізняє його від водню. При випаровуванні неону можна відвести в 3,3 рази більше тепла, ніж при випаровуванні такого ж об'єму рідкого водню [6]. Однак температура кипіння неону на 5 К вище за температуру кипіння водню і при атмосферному тиску становить 27.2К. Неон не піддається конверсії, його температура легко підтримується стабільною. Неон дуже зручний для попереднього охолодження апаратури, що заповнюється рідким гелієм, що зменшує витрати рідкого гелію.

Висока теплота випаровування дозволяє порівняно легко забезпечувати тривале зберігання рідкого неону. Навіть у судинах невеликої ємності протягом місяця випаровується близько 10% рідини [6]. Неон отримують з повітря (зміст дуже малий $1.8 \times 10^{-3}\%$ за обсягом) [6]. Ця обставина, мабуть, стала причиною його високої вартості і відповідно малої поширеності в криогенній техніці. Отримують неон на повітророздільних установках у вигляді неонгелієвої суміші, в якій після очищення азоту міститься 30% He і 70% Ne; подальше очищення суміші від гелію проводиться адсорбційним чи конденсаційним методом [6].

Розробка криогенних систем, що використовують неон, вимагає знання його теплофізичних констант, параметрів стану та діаграми стану у широкому інтервалі температур та тисків.

Застосування неону в низькотемпературних циклах хоч і обмежене, проте кількість криогенних систем, що використовують неон, постійно збільшується. Неон зручний як джерело холоду для конденсації водню, оскільки температура його кипіння 27.2 К, нижче критичної температури водню, що дорівнює 33.2 К [6]. Перша неонова криогенна система була практично здійснена Худом і Гріллі в Лос-Аламоській лабораторії в 1952 [6].

Застосування рідкого неону виявилось доцільним для охолодження потужного електромагніту. При охолодженні до 27 К різко знижується електроопір обмотки такого магніту, виконаної з чистого алюмінію. Це веде до суттєвого зниження витрати потужності. Розроблений для охолодження електромагніту неоновий холодильний цикл дозволяє отримувати до 2000 кг на добу рідкого неону. Успішно застосовується неон для деяких типів мікрокриогенних пристроїв, де його витрати невеликі.

У ході виконання роботи необхідно розрахувати параметри оптимального циклу роботи гелієвого зріджувача при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням в якості зовнішнього навантаження зріджувача неону. Також

потрібно розробити конструкцію зріджувача неону. Зробити порівняння характеристик розробленого зріджувача з існуючими аналогами.

Таблиця 2.1- Порівняльна характеристика основних циклів, що використовуються для зрідження гелію, за даними роботи [17].

Найменування циклу зрідження	Каскадний цикл з використанням рідких N ₂ та H ₂	Детандерний цикл із запобіжним охолодженням рідким N ₂	Каскадний детандерний цикл без використання холодоагентів
Коефіцієнт зрідження у %	15	6.7	5.0
Розмір питомої розрахункової витрати енергії у кВт год/л рід He	3.4*	2.6**	1.97
Прийнята різниця температур на теплому кінці теплообмінника для різних температурних зон зріджувача в К	$\Delta T_{290\text{ К}}=15$ $\Delta T_{70\text{ К}}=5$ $\Delta T_{21\text{ К}}=3$ $\Delta T_{15\text{ К}}=1$	$\Delta T_{290\text{ К}}=15$ $\Delta T_{70\text{ К}}=3$ $\Delta T_{11-12\text{ К}}=1$	$\Delta T_{290\text{ К}}=6$ $\Delta T_{60-70\text{ К}}=3$ $\Delta T_{11-12\text{ К}}=1$
Кількість детандерів, що використовуються в циклі	-	1	2
Прийняте значення адіабатичного К.П.Д. детандера	-	0.80	$\eta_{\text{ад}1}=0.7$ $\eta_{\text{ад}2}=0.8$
Частка гелію, що направляється на детандер, по відношенню до кількості гелію, стисненого компресором	-	0.70	0.25 0.50
* При витраті рідкого H ₂ 1.3 л/л рід He та витраті рідкого N ₂ -1.5 л/л рід He			
** При витраті енергії отримання рідкого азоту 1.2 кВтгод/кг рід N ₂			

3 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛУ ГЕЛІЄВОГО ЗРІДЖУВАЧА

3.1 Вихідні дані:

Тиск прямого потоку	$P_2=2.6$ МПа
Тиск після детандеру	$P_{10}=0.12$ МПа
Втрати тиску зворотного потоку	$\Delta P=0.02$ МПа
Температура навколишнього середовища	$T_{н.с}=300$ К
Температура прямого потоку після азотної ванни	$T_4=83$ К
Різниця температур на теплому кінці попереднього теплообмінника (II)	$\Delta T=15$ К
Температура кипіння рідкого азоту	$T_{N_2}=77.36$ К
Різниця температур між потоками на теплому кінці основного теплообмінника (VII)	$\Delta T=1.0\div 0.5$
Адіабатичний К.П.Д. детандера	$\eta_{ад}=0.7\div 0.8$
Витрата гелію	$G_{He}=360$ м ³ /год

3.2 Принципова схема зріджувача гелію

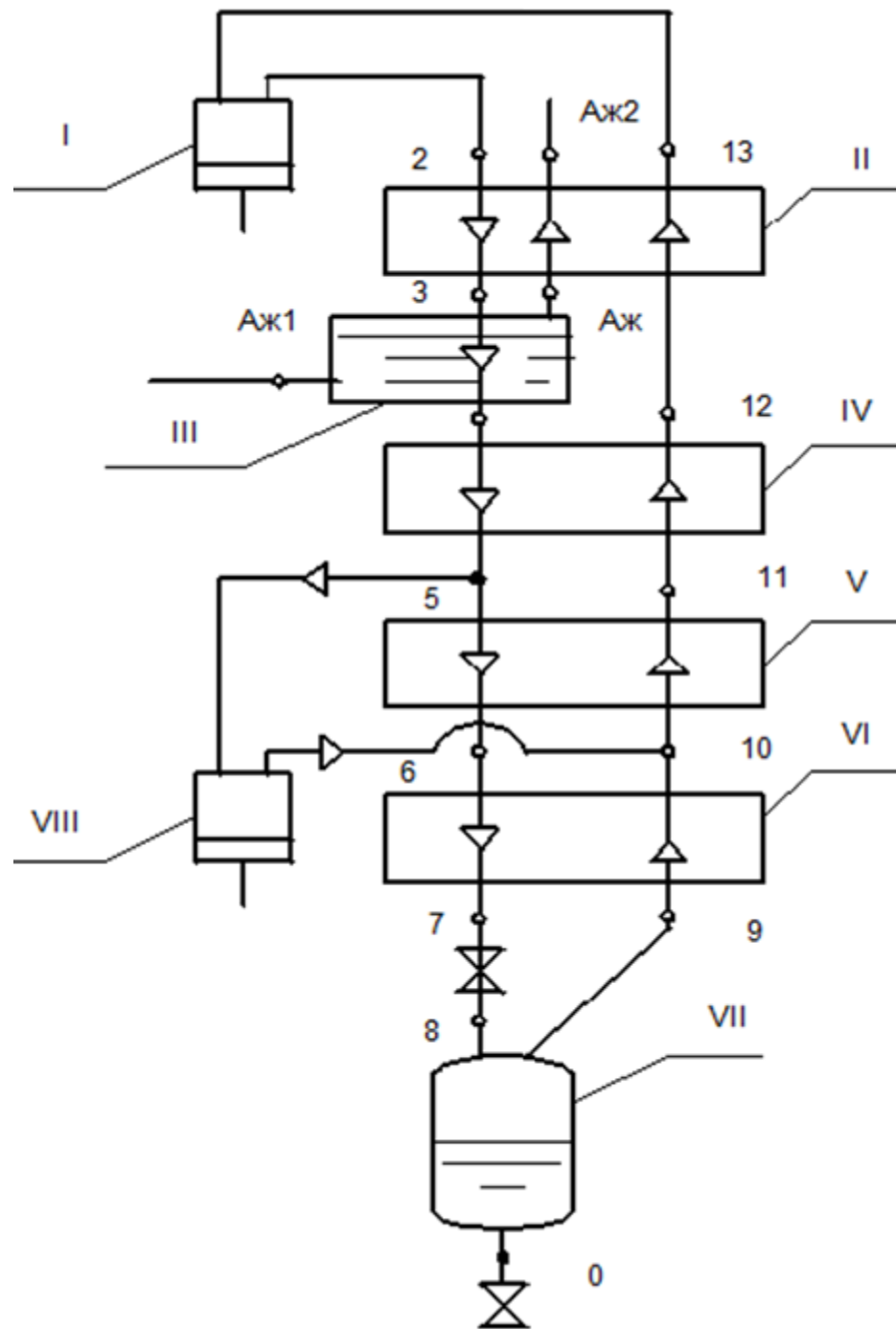


Рисунок 3.1. Принципова схема зріджувача гелію.

I-компресор; II-попередній теплообмінник; III-азотна ванна;
 IV-теплообмінник; V-детандерний теплообмінник; VI-основний
 теплообмінник; VII-збірник гелію; VIII-детандер

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

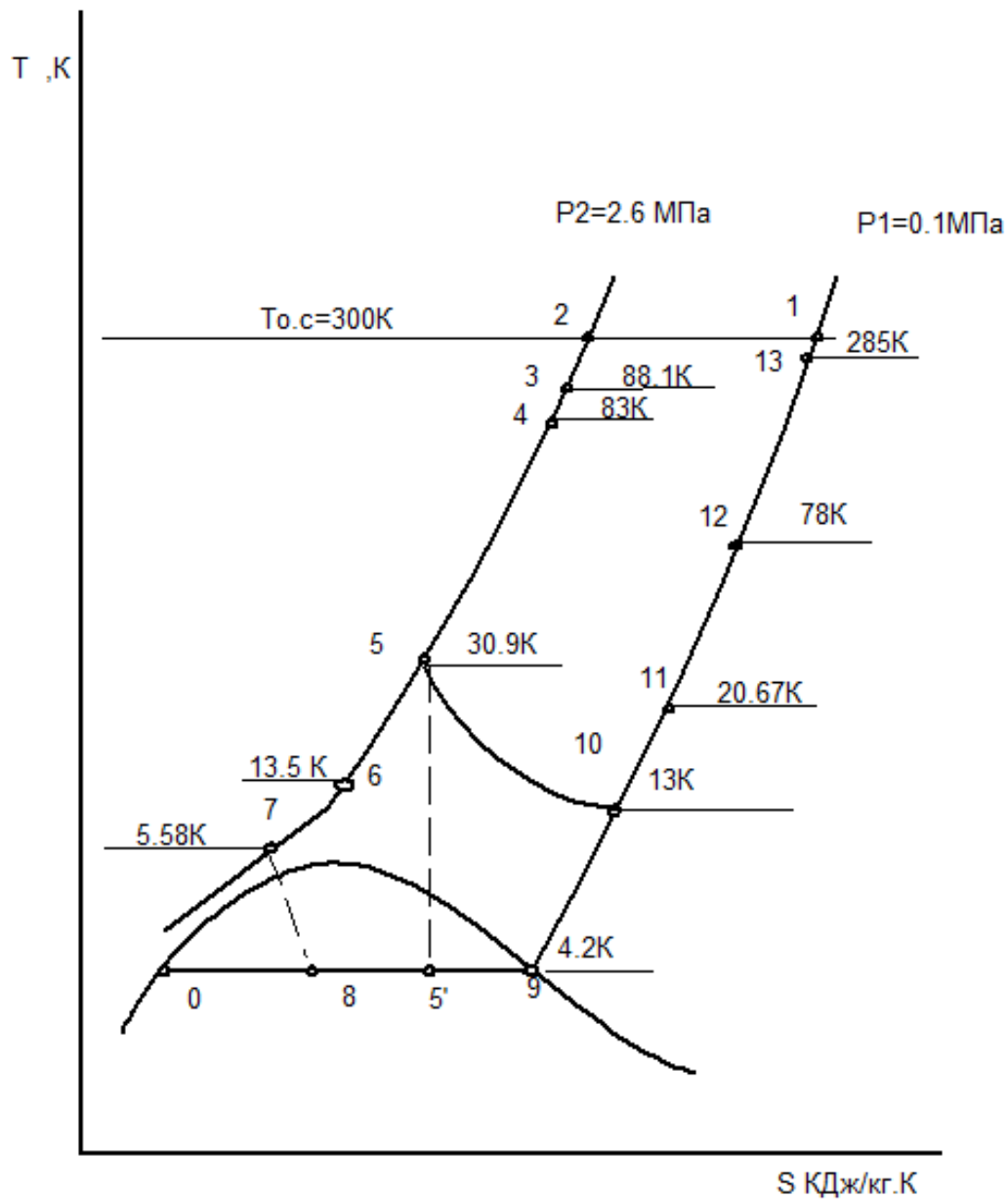


Рисунок 3.2 T-S-діаграма циклу гелієвого зріджувача.

3.3 Теплоприливи з навколишнього середовища

Дані за теплоприливами обрані за даними таблиці 1.6[1]:

для дросельного гелієвого циклу - 32% від $(i_6 - i_0)$;

для детандерного гелієвого циклу - 13% від $(i_4 - i_6)$;

для циклу рідкого азоту - 15% від $(i_2 - i_4)$.

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

3.4 Визначення температури гелію за детандером

На початковій стадії розрахунку прийнято сім значень температур гелію за детандером: 9.0; 10.0; 11.0; 12.0; 13.0; 14.0, 15.0 К, які при вибраній різниці температур на теплому кінці теплообмінника VII відповідно дають наступні значення температур стисненого гелію перед цим теплообмінником

при $\Delta T=1K$: 10.0; 11.0; 12.0; 13.0; 14.0; 15.0; 16.0К;

при $\Delta T=0.5K$: 9.5; 10.5; 11.5; 12.5; 13.5; 14.5; 15.5К.

Виходячи з прийнятих значень температур гелію за детандером та приймаючи значення адіабатичного К.П.Д. детандера рівним 0.7 та 0.8, визначимо стан стиснутого гелію перед детандером. Значення параметрів основних точок процесу для різних температур гелію після детандера та різних значень адіабатичного К.П.Д. детандера наведено в таблицях 3.1; 3.2; 3.3.

Таблиця 3.1 -Параметри основних точок процесу при $\Delta T=1K$ та $\eta_{ад}=0.7$

РЕЖИМ	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		10	5'	5	6
1	T,К	9.0	5.5	19.6	10.0
	P , Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I ,КДж/кг	59.2	38.6	107.3	45.3
	S,КДж/кг.К	12.7	9.9	9.9	5.8
2	T,К	10.0	6.0	21.5	11.0
	P ,Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I , КДж/кг	64.7	41.9	118.0	51.3
	S,КДж/кг.К	13.3	10.4	10.5	6.4
3	T,К	11.0	6.5	23.5	12.0
	P , Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60

	I ,КДж/кг	70.1	44.9	128.9	57.6
	S,КДж/кг.К	13.8	10.9	10.9	6.9
4	T,К	12.0	7.0	25.0	13.0
	P ,Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I , КДж/кг	75.5	47.9	138.3	64.2
	S,КДж/кг.К	14.3	11.3	11.3	7.4
5	T,К	13.0	7.6	26.0	14.0
	P , Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I , КДж/кг	80.9	50.8	149.7	70.7
	S, КДж/кг.К	14.7	11.9	11.9	7.9
6	T,К	14.0	8.0	29.4	15.0
	P , Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I , КДж/кг	86.2	53.6	162.1	77.2
	S,КДж/кг.К	15.1	12.1	12.1	8.6
7	P , Мпа	15.0	8.8	30.5	16.0
	I , КДж/кг	0.12	0.12	2.60	2.60
	S, КДж/кг.К	91.5	58.4	169.0	83.7
	S, КДж/кг.К	15.5	12.6	12.6	8.3

Таблиця 3.2 -Параметри основних точок процесу при $\Delta T=1K$ та $\eta_{ад}=0.8$

РЕЖИМ	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		10	5'	5	6
1	T,К	9.0	6.3	22.4	10.0
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	59.2	43.7	123.7	45.3
	S, КДж/кг.К	12.7	10.7	10.7	5.8
2	T,К	10.0	7.0	23.9	11.0
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	64.7	47.9	131.9	51.3
	S, КДж/кг.К	13.3	11.3	11.3	6.4
3	T,К	11.0	7.5	26.0	12.0
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	70.1	50.8	144.0	57.6
	S, КДж/кг.К	13.8	11.7	11.7	6.9
4	T,К	12.0	8.2	28.52	13.0
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	75.5	54.8	158.2	64.2
	S, КДж/кг.К	14.3	12.3	12.3	7.4
5	T,К	13.0	8.9	30.9	14.0
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	80.9	58.1	171.9	70.7
	S, КДж/кг.К	14.7	12.7	12.7	7.9

6	Т,К	14.0	9.5	32.8	15.0
	Р, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	І, КДж/кг	86.2	62.0	183.0	77.2
	S, КДж/кг.К	15.1	13.0	13.0	8.6
7	Т,К	15.0	10.3	34.5	16.0
	Р, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	І, КДж/кг	91.5	166.3	192.1	83.7
	S, КДж/кг.К	15. 5	13.5	13.5	8.8

Таблиця 3.3 -Параметри основних точок процесу при $\Delta T=0.5$ К та $\eta_{ад}=0.8$

РЕЖИМ	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		10	5'	5	6
1	Т,К	9.0	6.3	22.4	9.5
	Р, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	І, КДж/кг	59.2	43.7	123.7	42.5
	S, КДж/кг.К	12.7	10.7	10.7	5.5
2	Т,К	10.0	7.0	23.9	10.5
	Р, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	І, КДж/кг	64.7	47.9	131.9	48.2
	S, КДж/кг.К	13.3	11.3	11.3	6.1
3	Т,К	11.0	7.5	26.0	11.5
	Р, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60

	I, КДж/кг	70.1	50.8	144.0	54.4
	S, КДж/кг.К	13.8	11.7	11.7	6.6
4	T, К	12.0	8.2	28.5	12.5
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	75.5	54.8	158.2	60.9
	S, КДж/кг.К	14.3	12.3	12.3	7.2
5	T, К	13.0	9.0	30.9	13.5
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	80.9	58.1	171.9	67.4
	S, КДж/кг.К	14.7	12.7	12.7	7.7
6	T, К	14.0	9.5	32.8	14.5
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	86.2	62.0	183.0	74.0
	S, КДж/кг.К	15.1	13.0	13.0	8.1
7	T, К	15.0	10.3	34.5	15.5
	P, Мпа	0.12	0.12	2.60	2.60
	I, КДж/кг	91.5	66.3	192.1	80.5
	S, КДж/кг.К	15.5	13.5	13.5	8.6

Для прийнятих значень температур гелію після розширення в детандері визначимо кількість гелію, що циркулює в гелієвому дросельному та детандерному циклах. При розрахунку кожного з чотирьох режимів для можливості їх порівняння величину теплоприпливу як для дросельного, так і для детандерного циклу приймаємо постійною і відповідно рівною

$$q^{T<T_6} = 0.32(i_6 - i_0) \quad (3.1)$$

$$q^{T<T_4} = 0.13(i_4 - i_6) \quad (3.2)$$

в які входять значення i_6 , знайдені для 2-го режиму, тоді:

$$q^{T<T_4} = 0.13(i_4 - i_6)$$

$$q^{T<T_6} = 0.32(51.347 - 10.465) = 13.08 \text{ кДЖ/кг рід. Не}$$

$$q^{T<T_4} = 0.13(451.665 - 51.347) = 52.04 \text{ кДЖ/кг рід. Не} \quad (3.3)$$

для $\Delta T = 0.5\text{К}$

$$q_3^{T<T_6} = 0.32(48.287 - 10.465) = 12.1 \text{ кДЖ/кг рід. Не} \quad (3.4)$$

$$q_3^{T<T_4} = 0.13(451.665 - 48.287) = 52.4 \text{ кДЖ/кг рід. Не} \quad (3.5)$$

3.5 Визначення матеріальних та теплових потоків

Кількість гелію, що циркулює в гелієвому дросельному циклі, визначаємо виходячи з холодильного навантаження на цей цикл. В даному випадку холодильне навантаження складається з кількості тепла, що відводиться від гелію, що зріджується, і рівного різниці ентальпій ($i_6 - i_0$), а також теплоприпливу з навколишнього середовища для температурної зони зріджувача, що лежить нижче температури T_6 .

Розрахунок виконуємо для всіх режимів. Результати розрахунків зведені у таблицях 3.4; 3.5; 3.6.

Кількість гелію, що циркулює в дросельному ступені визначимо за формулою

$$y_{др} = ((i_6 - i_0) + q_3^{T<T_6}) / (i_{10} - i_6) \quad (3.6)$$

Кількість гелію, що циркулює в детандерному гелієвому циклі, визначаємо з холодильного навантаження на детандерний цикл за формулою

$$y_{дет} = \frac{(i_4 - i_6) + y_{др}[(i_4 - i_6) - (i_{12} - i_{10})] + q_3^{T<T_4}}{(i_{12} - i_4) + (i_5 - i_{10})} \quad (3.7)$$

Частка гелію, що направляється в детандерний гелієвий цикл, від загальної кількості гелію, що стискається компресором, становить

$$\frac{y_{дет}}{y_{к}} 100\% \quad (3.8)$$

Коефіцієнт зрідження гелію дорівнює:

$$E = \frac{y_{ж}}{y_{к}} \times 100\% \quad (3.9)$$

розрахунок робимо для всіх режимів. Результати розрахунків зведені в таблицях А4; А5; А6.

Витрату рідкого азоту, що йде на попереднє охолодження, визначаємо, виходячи з холодильного навантаження на рідкий азот. Це навантаження складається з тепла, що віднімається від стисненого гелію в процесі 2-4, холодопродуктивності, що вводиться в гелієвий дросельний і детандерний холодильні цикли, в інтервалі зміни температури гелію від $T_{0.c}$ до T_{N2} , а також теплоприплив з поза азотного екрану, азотної частини зріджувача, що працює в температурному інтервалі від $T_{н.с}$ до T_{N2} .

За даними таблиці 1.6[1] приймаємо величину теплоприпливів з навколишнього середовища до частини зріджувача, розташованої в зоні температур $T_{н.с}-T_{N2}$, та азотної ванні, що дорівнює 15% від тепла, що віднімається від стисненого гелію в процесі 2-4

$$q_3^{T>T4} = 0.15(i_2 - i_4) \quad (3.10)$$

$$q_3^{T>T4} = 0.15(1530.356 - 451.665) = 161.8 \text{ кДЖ/кг рід. Не} \quad (3.11)$$

Витрату рідкого азоту визначаємо за формулою

$$A_{ж} = \frac{(i_2 - i_4) + (y_{др} + y_{д})[(i_2 - i_4) - (i_{13} - i_{12})] + q_3^{T>T4}}{i_{A2} - i_{A1}} \quad (3.12)$$

Розрахунок виконуємо для всіх режимів. Результати розрахунків зведені у таблицях 3.4; 3.5: 3.6.

Таблиця 3.4 -Зведені дані розрахунку, при $\Delta T=1K$ та $\eta_{AD}=0.7$

ПАРА- МЕТРИ	ТЕМПЕРАТУРА ПІСЛЯ ДЕТАНДЕРА T_{10} , K						
	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
КІЛЬКІСТЬ He, ЯКИЙ ЦИРКУЛИРУЮЄ У ГЕЛІЄВОМ ДРОССЕЛЬ- НОМУ ЦИКЛІ У КГ/КГ.Ж He	3.44	4.02	4.83	5.88	7.22	8.92	11.03
КІЛЬКІСТЬ He ЯКИЙ ЦИРКУЛИРУЮЄ У ГЕЛІЄВОМ ДЕТАНДЕР- НОМУ ЦИКЛІ У КГ/КГ.Ж He	37.43	29.2	24.2	22.19	19.74	17.78	17.45
КІЛЬКІСТЬ He СТИС-МАЄМО КОМПРЕС- СІТОМ В КГ/КГ.Ж He	41.87	34.92	30.03	29.07	27.96	27.70	29.48
Частка потоку He направляємого до ДЕТАНДЕРУ	0.89	0.84	0.80	0.76	0.70	0.64	0.59
КОЕФІЦІЄНТ ЗРІДЖЕННЯ, %	0.024	0.029	0.033	0.034	0.0358	0.036	0.034
КІЛЬКІСТЬ N_2 НА 1КГ. Ж He	3.270	3.200	3.168	3.160	3.150	3.148	3.163
КІЛЬКІСТЬ N_2 в КГ	5.04	5.96	6.71	6.90	7.24	7.28	6.90
КІЛЬКІСТЬ He, ЯКИЙ ЗРІДЖУЄТЬСЯ У ЦИКЛІ У КГ	1.54	1.86	2.12	2.18	2.22	2.31	2.18

Таблиця 3.5 -Зведені дані розрахунку, при $\Delta T=1K$ та $\eta_{AD}=0.8$

ПАРА- МЕТРИ	ТЕМПЕРАТУРА ПІСЛЯ ДЕТАНДЕРА T10, К						
	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
КІЛЬКІСТЬ He який ЦИРКУЛЮЄ у ГЕЛІЄВОМУ ДРОССЕЛЬОМУ ЦИКЛІ у КГ/КГ.Ж He	3.44	4.02	4.83	5.88	7.22	8.92	11.03
КІЛЬКІСТЬ He який ЦИРКУЛЮЄ у ГЕЛІЄВОМУ ДЕТАНДЕРНОМУ ЦИКЛІ у КГ/КГ.Ж He	18.69	17.78	15.58	13.50	12.30	12.08	12.38
КІЛЬКІСТЬ He СТИСКАЄМО ГО КОМПРЕС- СОРОМ В КГ/КГ.Ж He	23.13	22.80	21.41	20.38	20.52	22.00	24.41
Частка потоку He, яка направляється до ДЕТАНДЕРУ	0.80	0.77	0.72	0.66	0.59	0.54	0.55
КОЕФІЦІЄНТ ЗРІДЖЕННЯ, %	0.043	0.0439	0.0467	0.049	0.048	0.045	0.041
КІЛЬКІСТЬ N ₂ НА 1КГ. Ж He	3.110	3.106	3.090	3.085	3.087	3.099	3.120
КІЛЬКІСТЬ N ₂ у КГ	8.59	8.76	9.27	9.71	9.51	8.95	8.21
КІЛЬКІСТЬ He ЗРІДЖУВАЄМО ГО У ЦИКЛІ У КГ	2.76	2.82	3.00	3.14	3.08	2.89	2.63

Таблиця 3.6 -Зведені дані розрахунку, при $\Delta T=05K$ и $\eta_{AD}=0.8$

ПАРАМЕТРИ	ТЕМПЕРАТУРА ПІСЛЯ ДЕТАНДЕРА T10, K						
	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
КІЛЬКІСТЬ He який ЦИРКУЛЮЄ у ГЕЛІЄВОМУ ДРОССЕЛЬНОМУ ЦИКЛІ В КГ/КГ.Ж He	2.63	3.03	3.58	4.17	5.14	6.19	7.44
КІЛЬКІСТЬ He який ЦИРКУЛЮЄ у ГЕЛІЄВОМУ ДЕТАНДЕРНОМУ ЦИКЛІ В КГ/КГ.Ж He	17.90	16.88	14.62	12.44	11.25	10.75	10.73
КІЛЬКІСТЬ НЕ СТИСМАЄМОГО КОМПРЕССОРОМ В КГ/КГ.Ж He	21.53	20.91	19.20	17.61	17.39	17.94	19.17
Частка потоку He що направляється до детандера	0.83	0.80	0.76	0.71	0.65	0.60	0.56
КОЕФІЦІЄНТ ЗРІДЖЕННЯ, %	0.046	0.048	0.052	0.057	0.058	0.056	0.052
КІЛЬКІСТЬ N ₂ НА 1КГ. Ж He	3.09	3.09	3.07	3.06	3.06	3.06	3.07
КІЛЬКІСТЬ N ₂ У КГ	9.14	9.13	10.27	11.21	11.40	11.02	10.27
КІЛЬКІСТЬ He ЗРІДЖУВАЕМОГО У ЦИКЛІ У КГ	2.95	3.08	3.34	3.66	3.76	3.59	3.34

З розрахунків будуємо залежності: $E(T_{10})$ (рисунок 3.3); $E(y_{дет})$ (рисунок 3.4); $A_p(T_{10})$ (Рисунок 3.5); $A_p(y_{дет})$ (рисунок 3.6); $A_p(y_{дет})$ (рисунок 3.7); $He_p(y_{дет})$ (рисунок 3.8)..

Коефіцієнт
зрідження, кг/кг

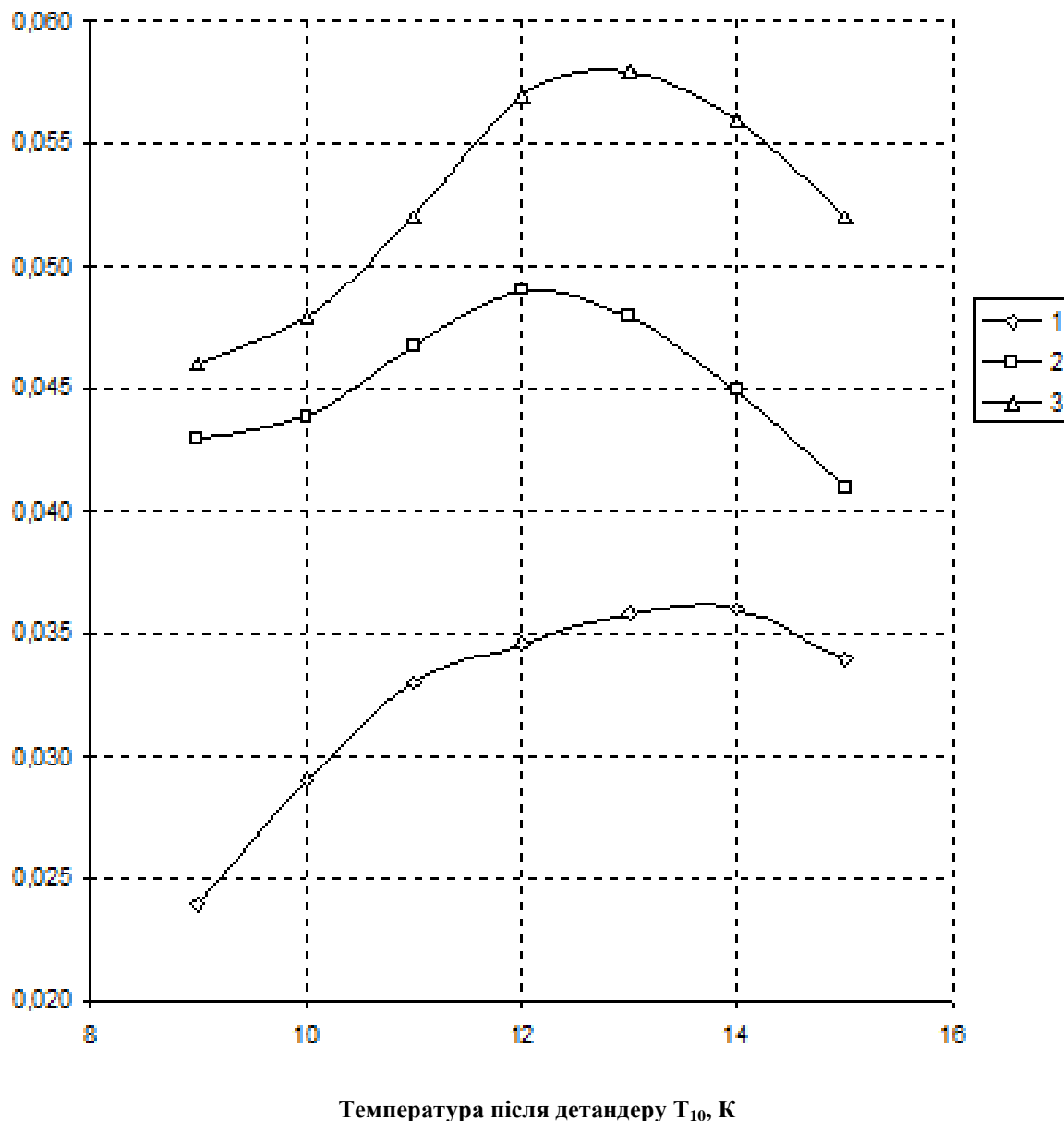


Рисунок 3.3 Залежність коефіцієнта зрідження від температури після детандеру T_{10}

1.- $\eta=0.7; \Delta=1K$; 2- $\eta=0.8; \Delta=1K$; 3- $\eta=0.8; \Delta=0.5K$

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

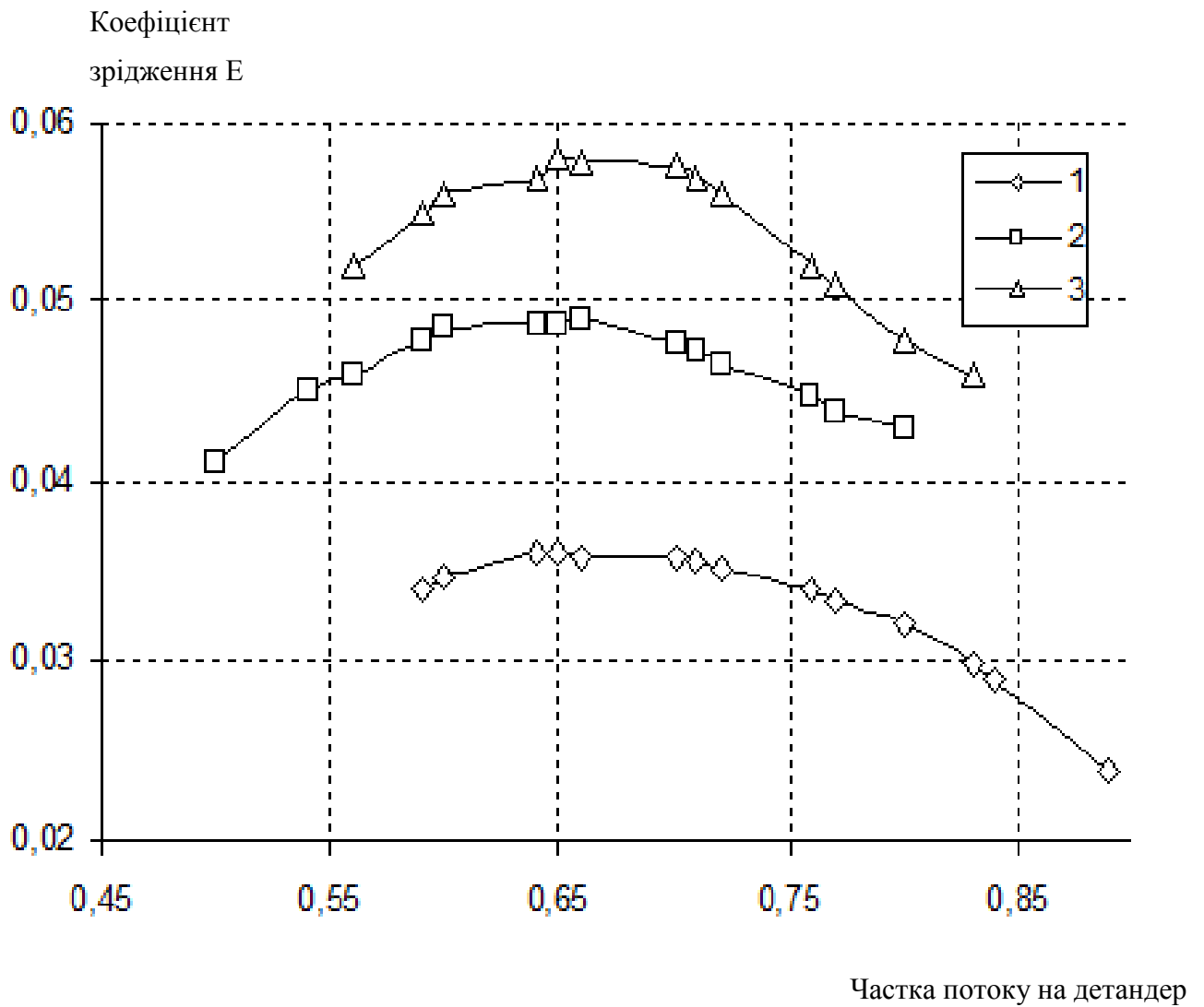


Рисунок 3.4 Залежність коефіцієнта зрідження

від частки потоку на детандер

1- $\eta=0.7$; $\Delta=1K$; 2- $\eta=0.8$; $\Delta=1K$; 3- $\eta=0.8$; $\Delta=0.5K$

Витрати азоту
кг/кг рід. Не

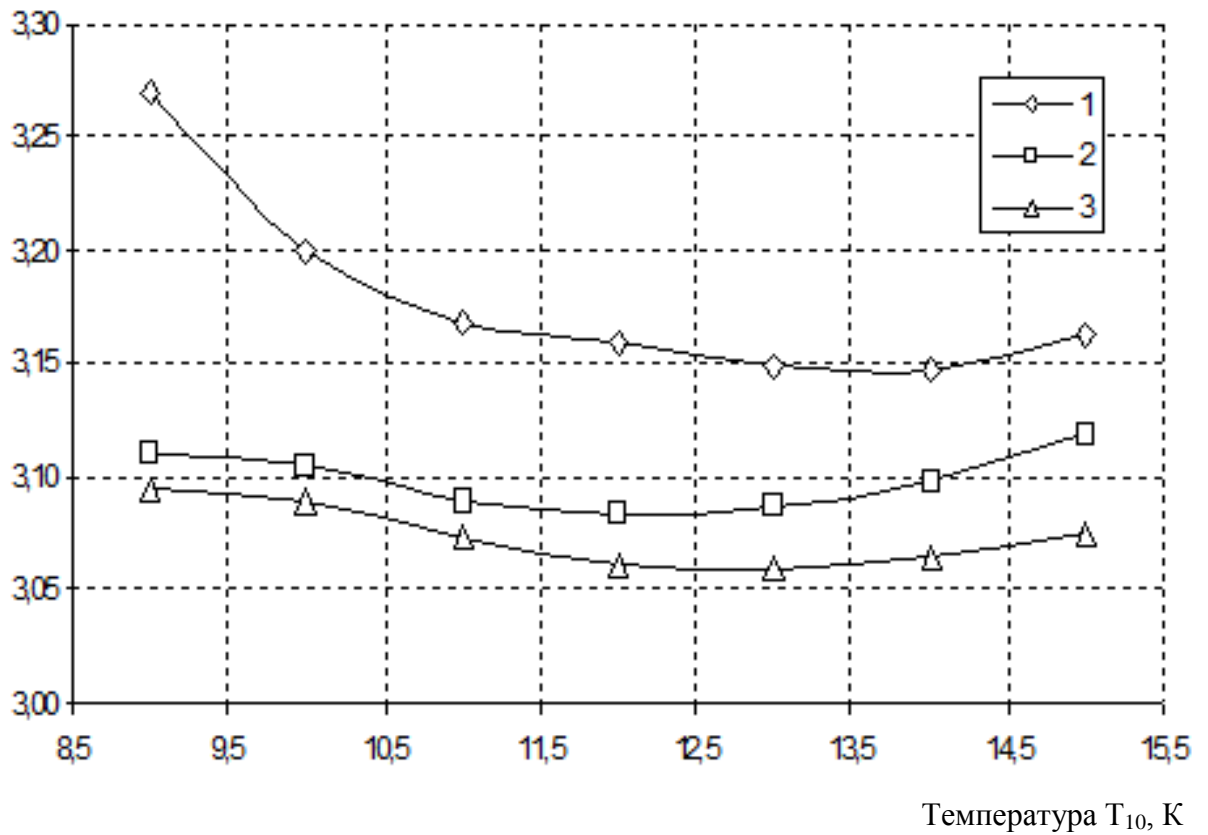
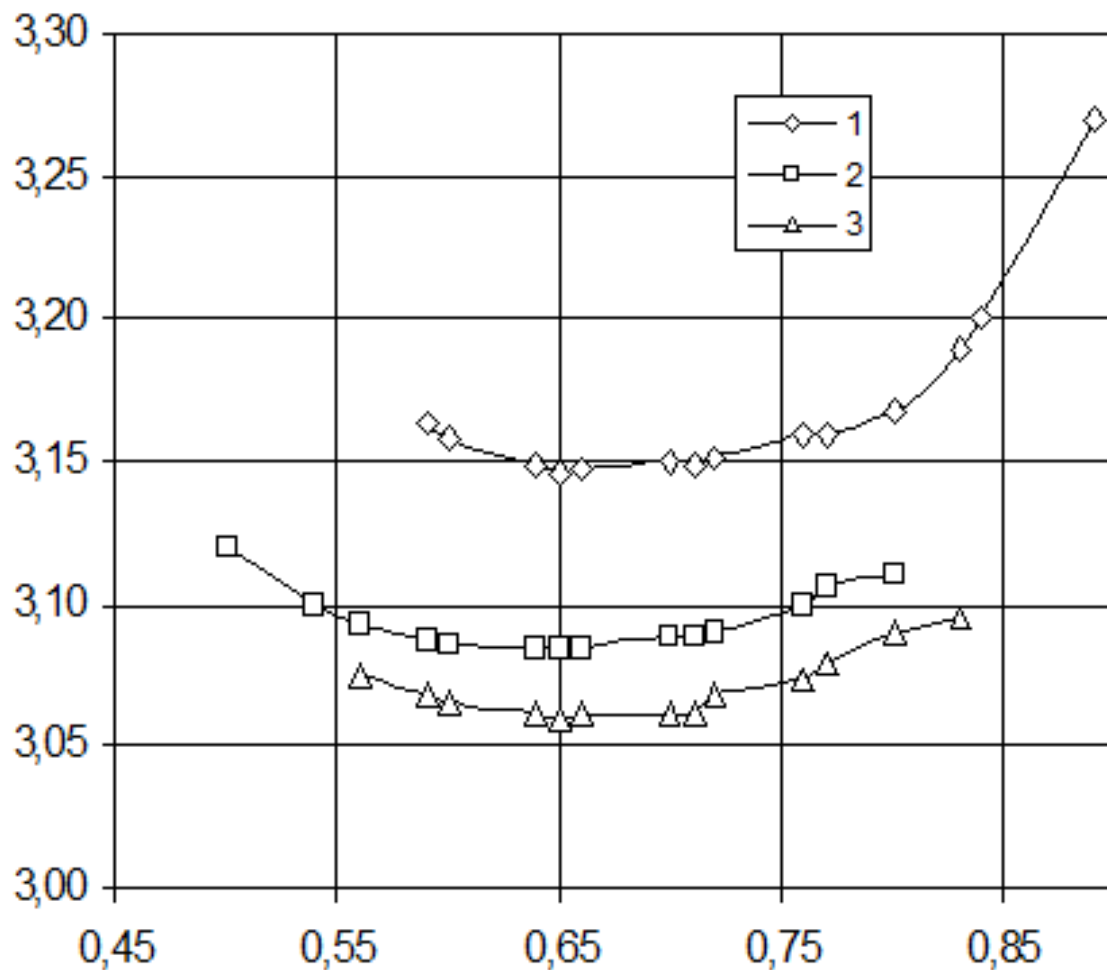


Рисунок 3.5 Залежність витрат азоту
від температури T_{10} потоку після детандеру
1- $\eta=0.7$; $\Delta=1\text{K}$; 2- $\eta=0.8$; $\Delta=1\text{K}$; 3- $\eta=0.8$; $\Delta=0.5\text{K}$

Витрати азоту

кг/кг рід. Не



Частка потоку на детандер

Рисунок 3.6 Залежність витрат азоту (A_p)

від частки потоку на детандер

1- $\eta=0.7$; $\Delta=1K$; 2- $\eta=0.8$; $\Delta=1K$; 3- $\eta=0.8$; $\Delta=0.5K$

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

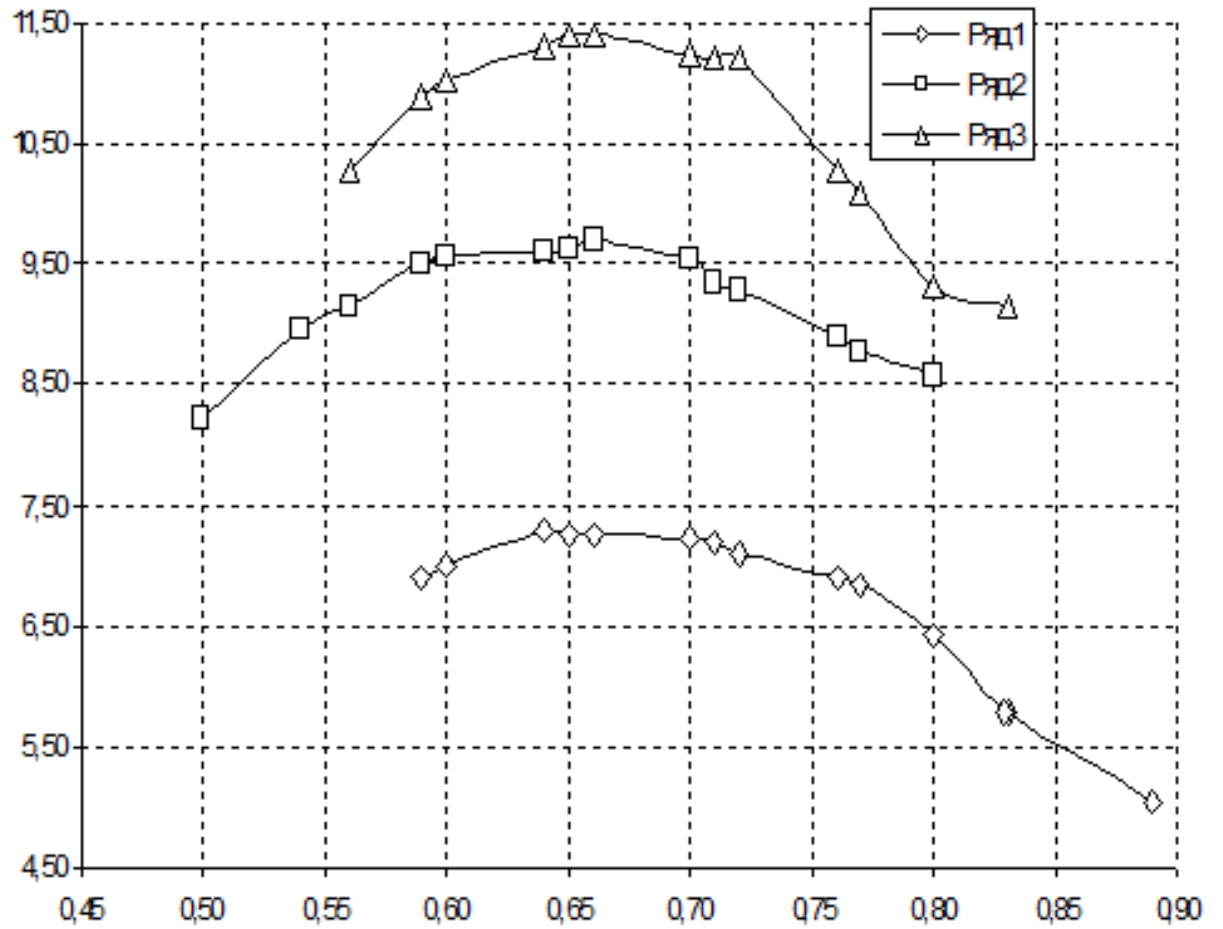
KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

32

Кількість азоту

A_p , кг

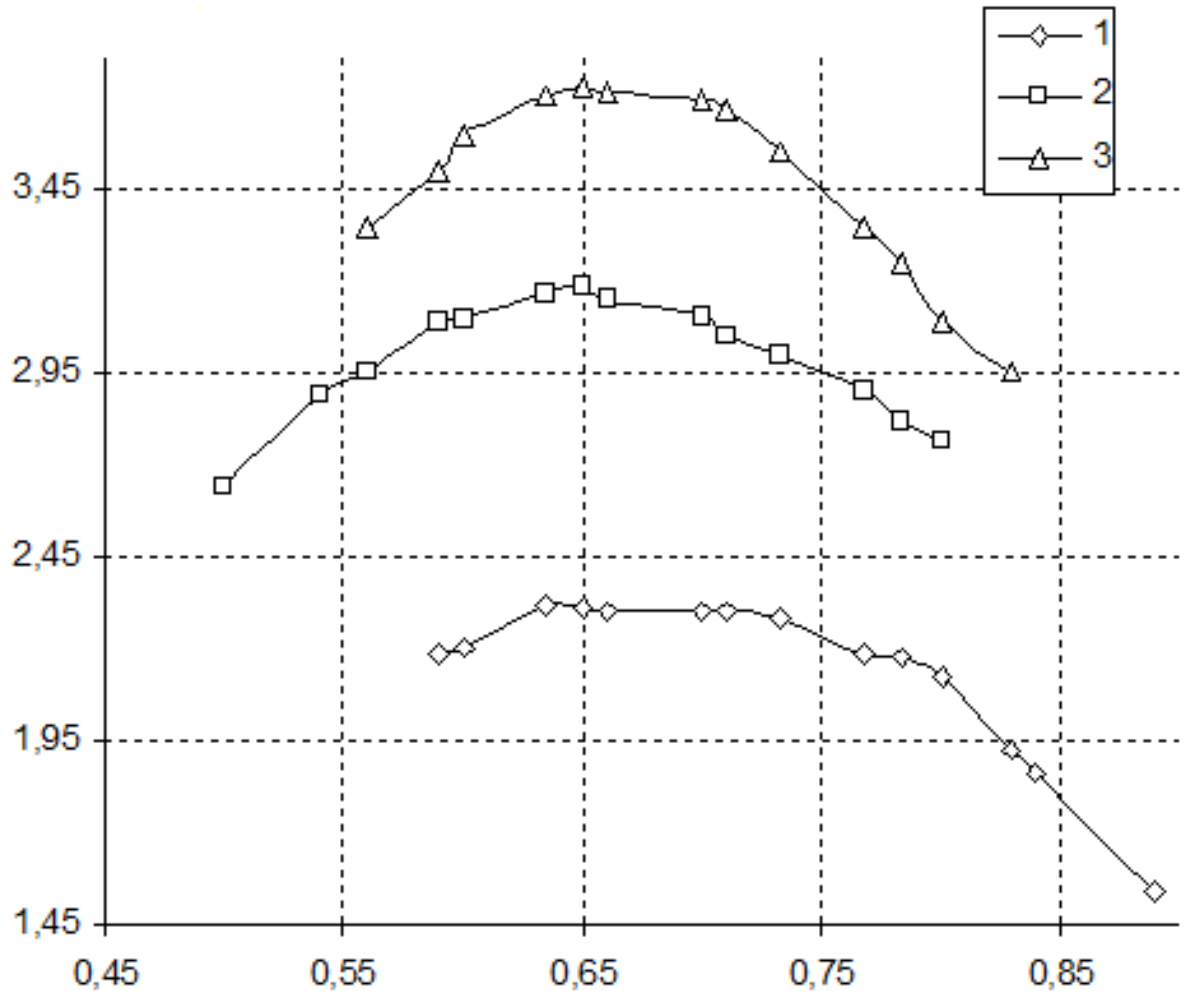


Частка потоку на детандер

Рисунок 3.7 Залежність витрати азоту (A_p) від частки потоку на детандер

1- $\eta=0.7$; $\Delta=1K$; 2- $\eta=0.8$; $\Delta=1K$; 3- $\eta=0.8$; $\Delta=0.5K$

Кількість рідкого
He, кг



Частка потоку на детандер

Рисунок 3.8 Залежність кількості зрідженого гелію від частки потоку на детандер

1- $\eta=0.7$; $\Delta=1\text{K}$; 2- $\eta=0.8$; $\Delta=1\text{K}$; 3- $\eta=0.8$; $\Delta=0.5\text{K}$

Порівнюючи результати розрахунків, отриманих для різних значень температури гелію після детандера та різних значень адіабатного К.П.Д. бачимо, що оптимальним є режим, у якому температура гелію за детандером

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

дорівнює 13К, $\Delta T=0.5$ и $\eta_{ад}=0.8$. Значення основних параметрів вузлових точок процесу для оптимального розрахункового режиму наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 -Параметри вузлових точок процесу

НОМЕР ТОЧКИ	P, МПа	T,К	S, КДж/кг.К	I, КДж/кг
1	0.10	300.0	31.5	1572.9
2	2.60	300.0	24.7	1530.3
3	2.60	88.1	18.4	478.9
4	2.60	83.0	18.0	451.6
5	2.60	30.9	12.7	171.9
6	2.60	13.5	7.7	67.4
7	2.60	5.6	3.5	24.5
8	0.12	4.2	6.5	24.5
9	0.12	4.2	8.5	30.8
10	0.12	13.0	14.7	80.9
11	0.12	20.7	17.2	121.6
12	0.12	78.0	24.1	420.0
13	0.10	285.0	31.2	1495.0
0	0.10	4.2	3.5	10.4
5'	0.12	9.0	12.7	58.1
Аж1	0.10	77.4	2.8	325.0
Аж2	0.10	285.0	6.8	550.0
Аж1*	0.10	77.3	5.4	125.0

З теплового балансу основного гелієвого теплообмінника визначаємо стан гелію перед дроселем

$$(y_{др} + 1)(i_6 - i_7) = y_{др}(i_{10} - i_9) - q_3^{T \leftarrow T_6} \quad (3.13)$$

$$(5.14 + 1)(64.487 - i_7) + 12.1 = 5.14(80.912 - 30.852) \quad (3.14)$$

$$i_7 = 24.55 \text{ КДж / кг}$$

$$T_7 = 5.58 \text{ К}$$

$$S = 3.5 \text{ КДж/кг.}$$

З теплового балансу детандерного теплообмінника визначаємо стан низького тиску гелію на виході з нього. При цьому холодовитрати, прийняті при розрахунку середньої зони зріджувача, розбиваємо на дві частини, віднісши їх до детандерного теплообмінника та гелієвого теплообмінника "теплої гілки".

Приймаємо:

$$q_3^{ДЕТ.Т} = 0.5q_3^{12-80K} = q_3^{ГЕЛ.Т} \quad (3.15)$$

$$q_3^{ДЕТ.Т} = 0.5 \times 52.44 = 26.22 \text{ КДж/кг} \quad (3.16)$$

$$(y_{др} + 1)(i_5 - i_6) + q_3^{ДЕТ.Т} = (y_{др} + y_{ДЕТ})(i_{11} - i_{10}) \quad (3.17)$$

$$6.14(171.9 - 67.487) + 26.22 = 16.39(i_{11} - 80.912) \quad (3.18)$$

$$i_{11} = 121.6 \text{ КДж / кг}$$

$$T_{11} = 20.6 \text{ К}$$

$$S_{11} = 17.2 \text{ КДж / кг.}$$

З метою перевірки попередніх розрахунків складаємо тепловий баланс гелієвого теплообмінника "теплої гілки".

$$(y_{др} + y_{ДЕТ} + 1)(i_4 - i_5) + q_3^{ГЕЛ.Т} = (y_{др} + y_{ДЕТ})(i_{12} - i) \quad (3.19)$$

$$17.39(451.665 - 171.9) + 26.2 = 16.39(420.041 - 121.63) \quad (3.20)$$

$$4891.3 \approx 4890.96 \quad (3.21)$$

Проведена перевірка показує задовільну збіжність теплового балансу.

З теплового балансу попереднього теплообмінника визначаємо стан стисненого гелію на вході у ванну рідкого азоту.

$$(y_{др} + y_{ДЕТ} + 1)(i_2 - i_3) + q_3^{ПР.Т} = (y_{др} + y_{ДЕТ})(i_{13} - i_{12}) + АЖ(i_{АЖ} - i_{А1}^*) \quad (3.22)$$

$$17.94(1530.356 - i_3) + 0.15 \times 161.8 = 16.94(1495.082 - 420.041) + 3.06 \times 225 \quad (3.23)$$

$$i_3 = 478.9 \text{ КДж / кг.}$$

$$T_3 = 88.1 \text{ К}$$

У цьому рівнянні $q_3^{\text{пр.т}}$ – холодовтрати в доквілля через ізоляцію для попереднього теплообмінника. Для визначення $q_3^{\text{пр.т}}$ розбиваємо прийняті раніше холодовтрати для верхньої температурної зони зріджувача по апаратах цієї зони. На частку попереднього теплообмінника припадатиме 15% от $q_3^{80-300\text{К}}$.

Для перевірки попереднього розрахунку складаємо рівняння теплового балансу азотної ванни та перевіряємо збіжність рівняння:

$$(i_3 - i_4)(y_{\text{др}} + y_{\text{дет}} + 1) + q_3^{A,B} = A_{\text{ж}}(i_{A1}^* - i_{A1}) \quad (3.24)$$

$$(478.9 - 451.66) \times 17.39 + 0.85 \times 161.8 = 3.08 \times 200 \quad (3.25)$$

$$611.81 \approx 612 \quad (3.26)$$

Зіставлення правої та лівої частин рівняння показує хорошу збіжність з-поміж них, що є підтвердженням правильності проведених раніше розрахунків. Питоме теплове навантаження на азотну ванну складе $Q_{\text{аз.в}} = 101.6 \text{ КДж / кг.}$

На підставі проведених розрахунків складаємо зведені таблиці матеріальних та теплових потоків теплообмінних апаратів (таблиця 3.8) та основних матеріальних потоків всієї зріджувальної установки (таблиця 3.9).

Наведений цикл дозволяє зріджувати 3.726 кг He/год, що становить 20.88 м³/год. газоподібного He або 29.81 л рідкого гелію.

Таблиця 3.8-Зведені дані матеріальних та теплових потоків теплообмінників

АПАРАТ	ПОТІК	ВЕЛИЧИНА ПОТОКУ В		ТИСК, МПа	ТЕМПЕРАТУРА, К		ТЕПЛО-ВА НАВАНТАЖЕННЯ, КДж/год
		$\frac{\text{кг}}{\text{кг.ж.Не}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{час}}$		ВХІД	ВИХІД	
Попередній теплообмінник (II)	Гелій високого тиску	17.39	64.25	2.6	300.0	88.0	67553
	Гелій низького тиску	16.39	60.52	0.10	78.1	285	
	Азот	3.06	11.40	0.10	77.4	285.0	
Азотна ванна (III)	Гелій високого тиску	17.39	64.25	2.60	88.1	83	1752
	Азот	3.06	11.40	0.10	77.4	77.4	
Гелієвий теплообмінник "тепла гілка"(IV)	Гелій високого тиску	17.39	64.25	2.60	83.0	30.9	17974
	Гелій низького тиску	16.39	60.52	0.12	26.7	78.0	
Детандерний теплообмінник (VI)	Гелій високого тиску	6.19	22.87	2.60	30.9	13.5	2387
	Гелій низького тиску	16.39	60.52	0.12	13.0	20.6	

Основний теплообмінник "холодна гілка"	Гелій високого тиску	6.19	22.82	2.60	13.5	5.58	981
	Гелій низького тиску	5.19	19.17	0.12	4.2	13.0	

Таблиця 3.9-Зведені дані щодо величини основних потоків зріджувальної установки

ПОТОКИ	ВЕЛИЧИНА	
	кг/кг.ж.Не	кг/година
Гелій, що стискається компресором, u_k	17.39	64.25
Гелій, що циркулює в детандерному гелієвому циклі, u_{DET}	11.25	41.56
Гелій, що циркулює в гелієвому дросельному циклі, u_{DR}	5.14	18.90
Зріджуваний гелій	1.00	3.69
Рідкий азот, $A_{ж}$	3.06	11.40

3.6 Визначення витрат електроенергії

Для визначення питомих витрат електроенергії приймаємо розрахункове значення ізотермічного ККД гелієвого компресора рівним 60%. Витрату енергії отримання рідкого азоту приймаємо рівним 1.2 кВт год /л.рід. N_2 (4.32МДж/л рід. N_2). Тоді розрахункова питома витрата енергії на зрідження 1кг гелію може бути визначена за формулою:

$$L = \frac{u_k \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{из}} + \frac{A_{ж} \cdot L_{N_2}}{\rho_{N_2}}, \text{ МДж / кг рід. Не} \quad (3.27)$$

де: $A_{ж}$ -кількість рідкого азоту, кг / кг. рід He

$\rho_{N_2} = 0.804$ кг/л - густина рідкого азоту;

$L_{N_2} = 4.32$ МДж/л.рід.N₂ – витрата енергії отримання рідкого азоту;

$\eta_{із} = 0.6$ - ізотермічний ККД компресора;

$R = 2.08$ кДж/кг К -газова стала для гелію;

$T_1 = 300$ К – температура довкілля;

P_1 і P_2 – відповідно тиск початку та кінця стиснення, МПа;

$P_1 = 0.1$ МПа;

$P_2 = 2.6$ МПа;

При розрахунку питомої витрати енергії на зрідження гелію не враховуються додаткові витрати, пов'язані з витратою енергії на роботу вакуум-насосів зріджувача, витратою рідкого азоту на блок очищення гелію і т.п.

Розрахунок виконуємо для режимів роботи:

1) $\Delta T = 1$, $\eta_{ад} = 0.7$

2) $\Delta T = 1$, $\eta_{ад} = 0.8$

3) $\Delta T = 0.5$, $\eta_{ад} = 0.8$

Усі отримані результати заносимо до таблиці 3.10

Загальну потужність, що витрачається на зрідження, визначаємо за формулою:

$$L_{заг} = L \times M, \text{ кВт} \quad (3.28)$$

де: M – кількість зрідженого гелію кг/годину;

Усі отримані результати заносимо до таблиці 3.10

Таблиця 3.10 - Потужності.

Режим роботи	Кількість рідкого He, кг/година	Кількість рідкого N ₂ кг/кг. He	Питомі витрати енергії на 1кг. L, кВт	Загальні витрати енергії L _{ЗАГ} , кВт год
$\Delta T = 1, \eta_{AD} = 0.7$	2.313	3.148	30.772	71.176
$\Delta T = 1, \eta_{AD} = 0.8$	3.184	3.060	23.786	74.878
$\Delta T = 0.5, \eta_{AD} = 0.8$	3.598	3.085	20.933	77.998

Із загальних питомих витрат енергії приблизно 40% посідає частку витрат пов'язаних з витратою рідкого азоту. Звідси випливає, що зменшення питомих енерговитрат значною мірою пов'язане зі зниженням витрати азоту, що використовується на попереднє охолодження.

Зважаючи на те, що енергія, що повертається детандером, становить дуже незначну частину від енергії, витраченої на стиснення гелію в компресорі, при визначенні питомих енерговитрат вона не враховується.

З усіх вище проведених розрахунків можна зробити висновок, що питома витрата енергії на зрідження одного кілограма гелію зменшується зі збільшенням адіабатичного ККД детандера і зменшення різниці температур потоків на теплом кінці основного теплообмінника.

4 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛУ ГЕЛІЄВОГО ЗРІДЖУВАЧА ПРИ РОБОТІ В РЕФРИЖЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ

4.1 Вихідні дані:

Тиск прямого потоку	$P_2 = 2.6 \text{ МПа}$
Тиск після детандеру	$P_6 = 0.12 \text{ МПа}$
Втрати тиску зворотного потоку	$\Delta P = 0.02 \text{ МПа}$
Температура навколишнього середовища	$T = 300 \text{ К}$
Температура прямого потоку після азотної ванни	$T_4 = 83 \text{ К}$
Різниця температур на теплову кінці попереднього	$\Delta T = 15 \text{ К}$
Теплообмінник (II)	
Різниця температур на теплову кінці теплообмінника (IV)	$\Delta T = 5 \text{ К}$
Температура кипіння рідкого азоту	$T_{N_2} = 77.36 \text{ К}$
Адіабатичний К.П.Д.	$\eta_{ад} = 0.8$
Витрата гелію	$G_{He} = 360 \text{ м}^3/\text{год}$

4.2 Принципова схема зріджувача гелію при роботі в рефрижераторному режимі

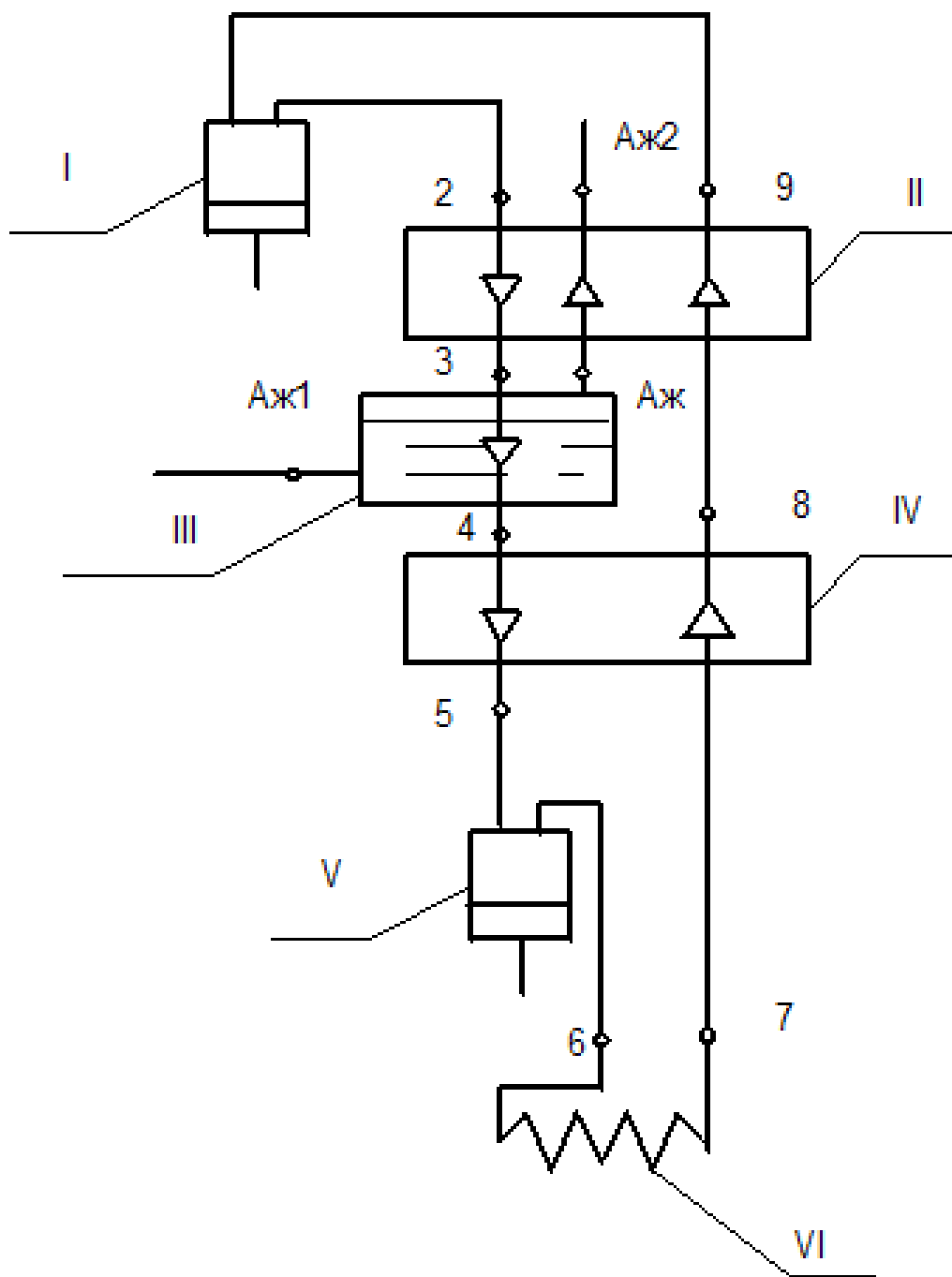


Рисунок 4.1 Принципова схема жителю гелію при роботі в рефрижераторному режимі.

I-компресор; II-попередній теплообмінник; III-азотна ванна;

IV-теплообмінник; V-детандер; VI-випарник

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

43

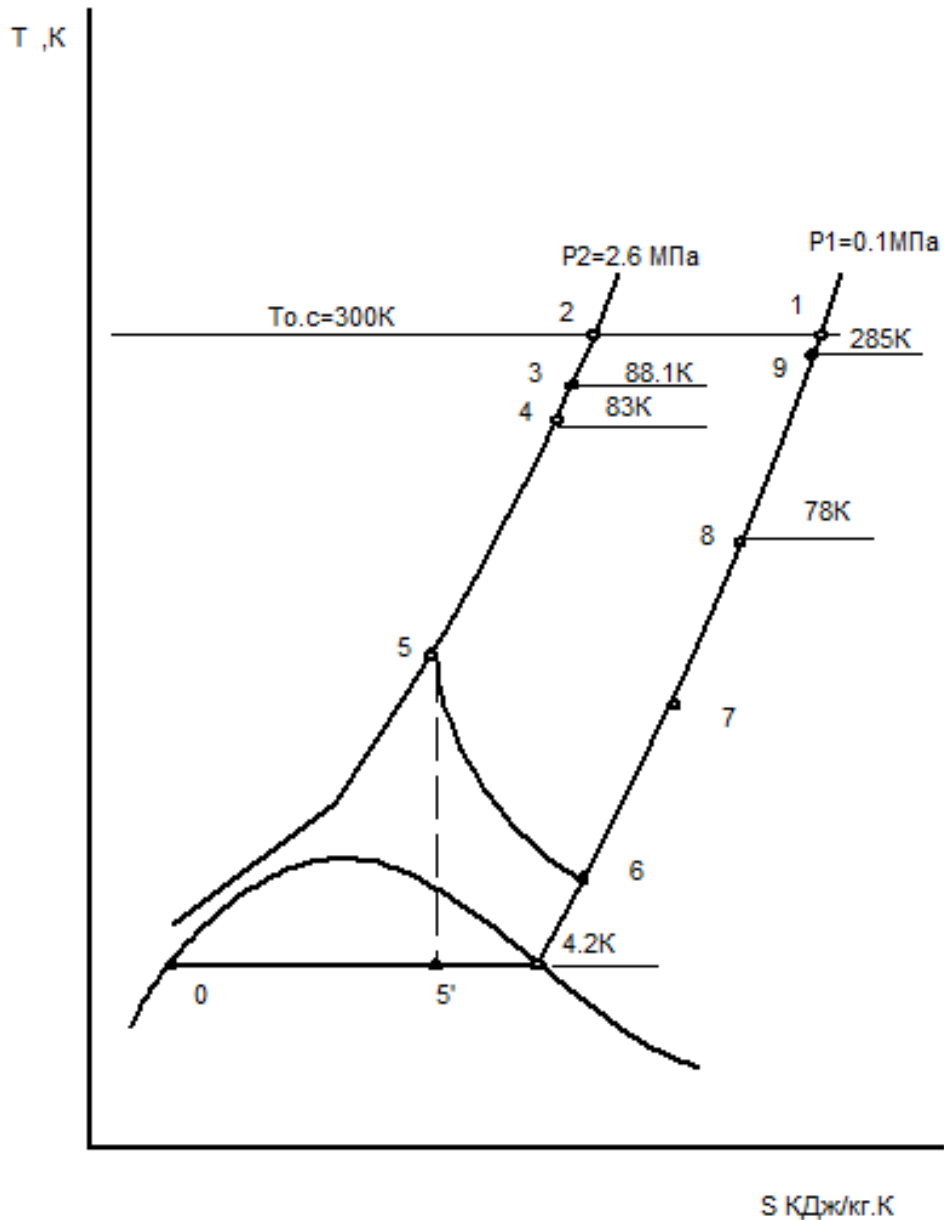


Рисунок 4.2 T-S-діаграма циклу гелієвого жителя при роботі в рефрижераторному режимі.

4.3 Теплоприпливи з навколишнього середовища

Дані теплоприпливів обрані за даними таблиці 1.6 [1]:

для детандерного гелієвого циклу склали -0.013% від (i_4-i_7)

для циклу рідкого азоту -0.02% від (i_2-i_4)

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

4.4 Визначення температури гелію після детандеру

Задаємося значенням температури на виході від споживача: 12.0; 16.0; 20.0; 24.0; 28.0; 32.0К.

Для визначення температури після детандера необхідно визначити температуру гелію на вході в детандер. Температура на вході до детандера визначається з енергетичного балансу теплообмінника (IV).

Складемо енергетичний баланс теплообмінника (IV):

$$i_4 + i_7 + q_3^{T<T^4} = i_5 + i_8 \quad (4.1)$$

Звідки
$$i_5 = i_4 + i_7 + q_3^{T<T^4} - i_8 \quad (4.2)$$

При розрахунку кожного з шести режимів для можливості їх порівняння величину теплоприпливів як для детандерного циклу так і азотного приймаємо постійною і відповідно рівною

$$q_3^{T<T^4} = 0.013 \times (i_4 - i_7) \quad (4.3)$$

$$q_3^{T>T^4} = 0.02(i_2 - i_4) \quad (4.4)$$

Згідно з обраними даними по теплоприпливам з навколишнього середовища, величина теплоприпливів склала для:

детандерного гелієвого циклу:

$$q_3^{T<80K} = 0.013(i_4 - i_5) = 0.013(451.6 - 96.8) = 4.6 \text{ КДж/кг. Не} \quad (4.5)$$

циклу рідкого азоту:

$$q_3^{T>80K} = 0.02(i_2 - i_4) = 0.02(1530.3 - 451.6) = 21.5 \text{ КДж/кг. Не} \quad (4.6)$$

Виходячи з розрахованої температури гелію на вході в детандер та приймаючи значення адіабатичного К.П.Д. детандера рівним 0.8 визначаємо стан гелію після детандера за формулою:

$$i_6 = i_5 - \eta_{\text{АД}}(i_5 - i_5') \quad (4.7)$$

Визначимо температуру гелію перед азотною ванною. В установці при роботі в рефрижераторному режимі в азотний теплообмінник попереднього ступеня потік гелію не подається, так потоки гелію рівні по масі. Складемо енергетичний баланс попереднього теплообмінника, з якого визначимо i_3 .

$$G_{\text{He}} \cdot i_2 + G_{\text{He}} \cdot i_8 + q_3 \cdot G_{\text{He}} = i_9 \cdot G_{\text{He}} + i_3 \cdot G_{\text{He}} \quad (4.8)$$

де: G_{He} - витрата потоку гелію стискаємого компресором, кг / год;

$$G_{\text{He}} = V_{\text{He}} \times \rho_{\text{He}} \quad (4.9)$$

$\rho_{\text{He}} = 0.178$ кг/м³ – густина гелію;

$$G_{\text{He}} = 360 \times 0.178 = 64.24 \text{ кг/год} \quad (4.10)$$

Підставивши всі значення рівняння 4.8, отримаємо:

$$i_3 = 465.8 \text{ кДж/кг};$$

$$T_3 = 85.6 \text{ К};$$

$$S_3 = 18.2 \text{ кДж/кг К}.$$

Значення параметрів основних точок процесу для різних температур гелію на виході від споживача наведено в таблиці 4.1.

4.5 Визначення холодопродуктивності

Виходячи з розрахованих параметрів основних точок процесу, можливо розрахувати холодопродуктивність гелієвого зріджувача при роботі в рефрижераторному режимі, залежно від температури гелію на виході від споживача.

Розрахунок холодопродуктивності виконуємо за формулою:

$$Q = G_{\text{He}}^K (i_7 - i_6) \quad (4.11)$$

Розрахунок проводимо для всіх семи режимів роботи. Отримані значення зведені до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1-Параметри основних точок процесу

РЕЖИМ	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		1	2	3	4
1	Т,К	300.0	300.0	85.6	83.0
	Р, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	465.8	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.2	18.0
2	Т,К	300.0	300.0	85.6	83.0
	Р, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	465.8	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.2	18.0
3	Т,К	300.0	300.0	85.6	83.0
	Р, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	465.8	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.2	18.0
4	Т,К	300.0	300.0	85.6	83.0
	Р, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	465.8	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.2	18.0
5	Т,К	300.0	300.0	85.6	83.0
	Р, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	465.8	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.2	18.0
6	Т,К	300.0	300.0	85.6	83.0
	Р, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	465.8	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.2	18.0

Продовження таблиці 4.1

РЕЖИМ	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		5	6	7	8
1	Т,К	20.4	7.8	12.0	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	111.8	52.7	75.5	420.0
	S, КДж/кг.К	10.3	11.9	14.3	24.1
2	Т,К	24.1	10.0	16.0	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	133.0	64.9	96.8	420.0
	S, КДж/кг.К	11.3	13.3	15.8	24.1
3	Т,К	27.8	11.8	20.0	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	154.1	74.1	117.9	420.0
	S, КДж/кг.К	12.1	14.3	17.0	24.1
4	Т,К	31.5	13.4	24.0	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	175.1	82.8	138.8	420.0
	S, КДж/кг.К	12.8	14.9	18.0	24.1
5	Т,К	35.4	14.2	28.0	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	196.0	90.5	159.7	420.0
	S, КДж/кг.К	13.5	15.3	18.8	24.1
6	Т,К	39.0	16.9	32.0	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	216.8	101.6	180.6	420.0
	S, КДж/кг.К	14.0	16.1	19.5	24.1

Продовження таблиці 4.1

РЕЖИМ	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ		
		9	5'	Q ₀ , Вт
1	Т,К	285.0	5.9	406.70
	Р, Мпа	0.10	0.12	
	І, КДж/кг	1495.8	38.0	
	S, КДж/кг.К	31.2	10.3	
2	Т,К	285.0	7.0	568.76
	Р, Мпа	0.10	0.12	
	І, КДж/кг	1495.8	47.9	
	S, КДж/кг.К	31.2	11.3	
3	Т,К	285.0	8.1	781.39
	Р, Мпа	0.10	0.12	
	І, КДж/кг	1495.8	54.1	
	S, КДж/кг.К	31.2	12.1	
4	Т,К	285.0	9.1	999.70
	Р, Мпа	0.10	0.12	
	І, КДж/кг	1495.8	59.8	
	S, КДж/кг.К	31.2	12.8	
5	Т,К	285.0	10.4	1235.28
	Р, Мпа	0.10	0.12	
	І, КДж/кг	1495.8	64.2	
	S, КДж/кг.К	31.2	18.5	
6	Т,К	285.0	11.5	1410.53
	Р, Мпа	0.10	0.12	
	І, КДж/кг	1495.8	72.8	
	S, КДж/кг.К	31.2	14.0	

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

49

На підставі проведених розрахунків та даних, що містяться в таблиці 4.1, можна побудувати залежність холодопродуктивності від температури на виході від споживача (рисунок 4.3).

Холодопродуктивність Q_0 , Вт

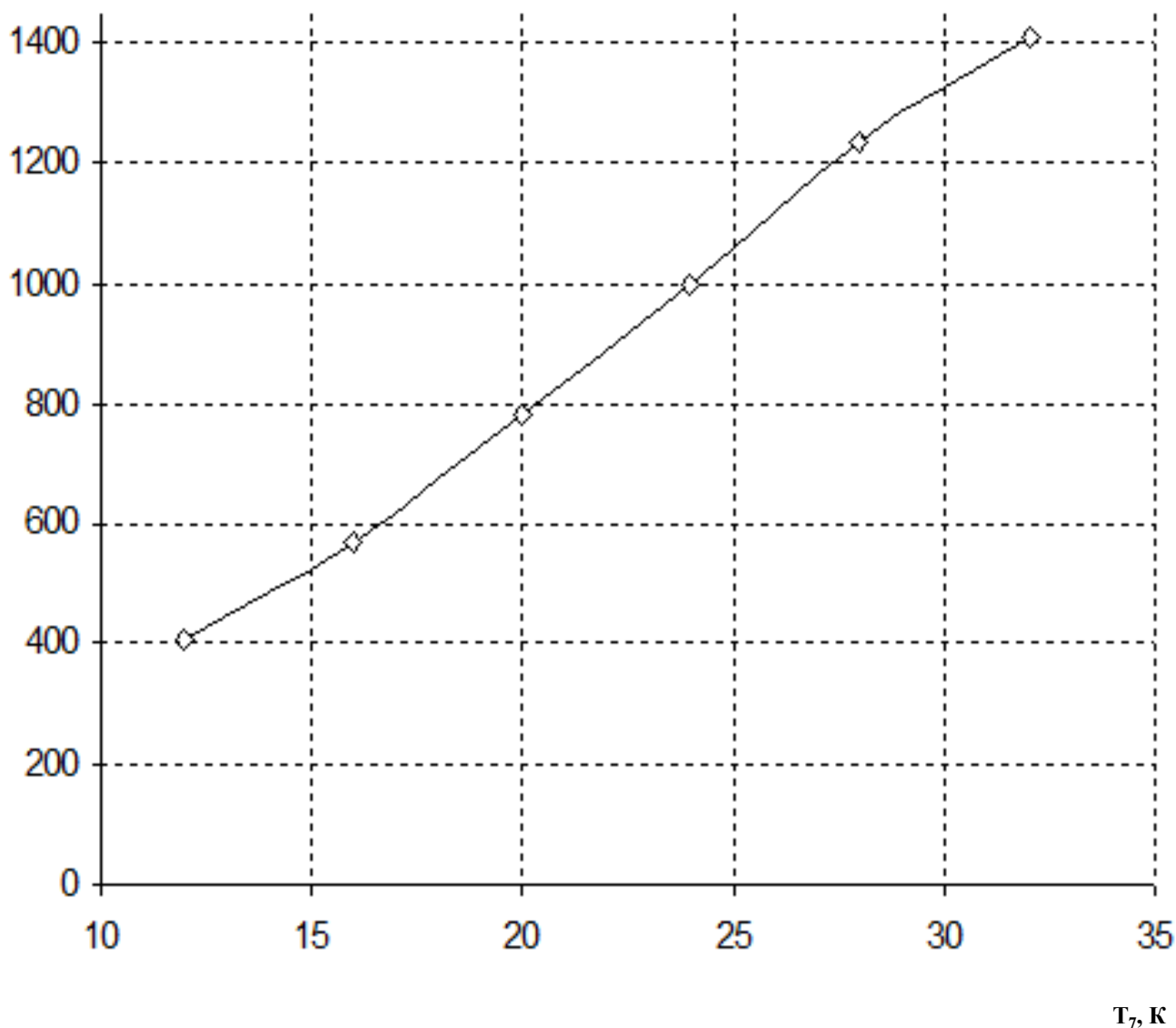


Рисунок 4.3 Залежність холодопродуктивності Q_0 від температури T_7

З усього вище названого робимо висновок, що гелієвий зріджувач в рефрижераторному режимі на рівні температур 16К забезпечує холодопродуктивність 568.76 Вт.

4.6 Визначення витрат енергії

Для визначення витрат електроенергії приймаємо розрахункове значення ізотермічного ККД гелієвого компресора рівним 60%. Витрата енергії отримання рідкого азоту приймаємо рівним 1.2 кВт год /л.рід.N₂ (4.32 МДж/л рід. N₂). Тоді розрахункова витрата може бути визначена за формулою:

$$L_{ЗАГ} = L - L_{ДЕТ} + L_{АЗ}, \quad \text{кВт год} \quad (4.12)$$

де: L –енергія, яка витрачається компресором, кВт год;

$L_{ДЕТ}$ - енергія, що повертається детандером, кВт год;

$L_{АЗ}$ – енергія, що витрачається на отримання рідкого азоту, кВт год;

Визначимо енергію, що витрачається компресором за формулою:

$$L = \frac{G_{He} \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{ИЗ} \cdot 3600}, \quad \text{кВт год} \quad (4.13)$$

де: $\eta_{ИЗ} = 0.6$ - ізотермічний ККД компресора;

$R = 2.08$ кДж/кг К -газова стала для гелію;

$T_1 = 300$ К – температура довкілля;

P_1 і P_2 – відповідно тиск початку та кінця стиснення, МПа;

$P_1 = 0.1$ МПа;

$P_2 = 2.6$ МПа;

$G_{He} = 64.24$ кг/годину;

При розрахунку питомої витрати енергії на зрідження гелію не враховуються додаткові витрати, пов'язані з витратою енергії на роботу вакуум-насосів зріджувача, витратою рідкого азоту на блок очищення гелію і т.п.

Підставивши всі необхідні значення у формулу (4.10) отримаємо:

$$L = 60.4 \text{ кВт год};$$

Визначимо енергію, що повертається детандером за формулою:

$$L_{\text{ДЕТ}} = (G_{\text{He}} \cdot (i_5 - i_6) \cdot \eta_M) / 3600, \text{ кВт год} \quad (4.14)$$

де: $\eta_M = 0.9$ – механічний ККД детандера;

Розрахунок проводимо для всіх шести режимів роботи, отримані дані заносимо до таблиці 4.1.

Визначимо витрати потужності на охолодження гелію в азотній ванні.

Визначимо теплове навантаження азотної ванни:

$$Q_{\text{A.B}} = G_{\text{He}}(i_3 - i_4) - q_3, \text{ кДж/год} \quad (4.15)$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (4.11) отримаємо:

$$Q_{\text{A.B}} = 901.7 \text{ кДж / год} = 0.25 \text{ кВт год};$$

Визначимо необхідну кількість азоту.

$$G_A = Q_{\text{A.B}} / r_A, \text{ кг/година} \quad (4.16)$$

де: $r_A = 198 \text{ кДж/кг};$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (4.13) отримаємо:

$$G_A = 4.5 \text{ кг/годину};$$

$$L_{\text{A.B}} = \frac{A_{\text{Ж}} \cdot L_{\text{N}_2} \cdot 10^3}{\rho_{\text{N}_2} \cdot 3600}, \text{ кВт} \quad (4.17)$$

де: $A_{\text{Ж}}$ -кількість рідкого азоту, кг / кг.

$\rho_{\text{N}_2} = 0.804 \text{ кг/л}$ – густина рідкого азоту;

$L_{N_2} = 4.32$ МДж/л.рід. N_2 – витрата енергії на отримання рідкого азоту;

Підставивши всі необхідні значення у формулу (4.14) отримаємо:

$$L_{A,B} = 6.7 \text{ кВт год};$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (4.9) отримаємо значення енергії, що витрачаються при роботі в рефрижераторному режимі. Розрахунок проводимо для всіх шести режимів роботи, отримані дані вносимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Витрати енергії

Температурний рівень T_6, K	Енергія на компресор $L, \text{ кВт год}$	Енергія, що повертається детандером $L_{ДЕТ}, \text{ кВт год}$	Енергія на витрату азоту $L_{A,B}, \text{ кВт год}$	Загальні витрати енергії $L_{ЗАГ}, \text{ кВт год}$
12	60.4	0.9	6.7	66.2
16	60.4	1.1	6.7	66.0
20	60.4	1.3	6.7	65.8
24	60.4	1.5	6.7	65.6
28	60.4	1.7	6.7	65.4
32	60.4	1.9	6.7	65.2

5 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛУ ГЕЛІЄВОГО ЗРІДЖУВАЧА ПРИ РОБОТІ В РЕФРИЖЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ З ПІДКЛЮЧЕННЯМ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Метою даного розрахунку є визначення частки зворотного потоку гелію, що подається до зріджувача неону, а також кількості неону, що зріджується.

5.1 Вихідні дані:

Тиск прямого потоку	$P_2 = 2.6 \text{ МПа}$
Тиск після детандеру	$P_6 = 0.12 \text{ МПа}$
Втрати тиску зворотного потоку	$\Delta P = 0.02 \text{ Мпа}$
Температура довкілля	$T_{н.с} = 300 \text{ К}$
Температура прямого потоку після азотної ванни	$T_4 = 83 \text{ К}$
Різниця температур на теплому кінці попереднього теплообмінника (II)	$\Delta T = 15 \text{ К}$
Різниця температур на теплому кінці теплообмінника (IV)	$\Delta T = 5 \text{ К}$
Температура кипіння рідкого азоту	$T_{N_2} = 77.36 \text{ К}$
Адіабатичний К.П.Д. детандера	$\eta_{ад} = 0.8$
Витрата гелію	$G_{He} = 360 \text{ м}^3/\text{год}$
Температура гелію на виході із зріджувача неону	$T_{10} = 280 \text{ К}$
Температура неону на вході в зріджувач	$T_{11} = 300 \text{ К}$
Температура конденсації неону	$T_{Ne} = 27.2 \text{ К}$

5.2 Принципова схема зріджувачу гелію при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням зовнішнього навантаження (зріджувачу неону)

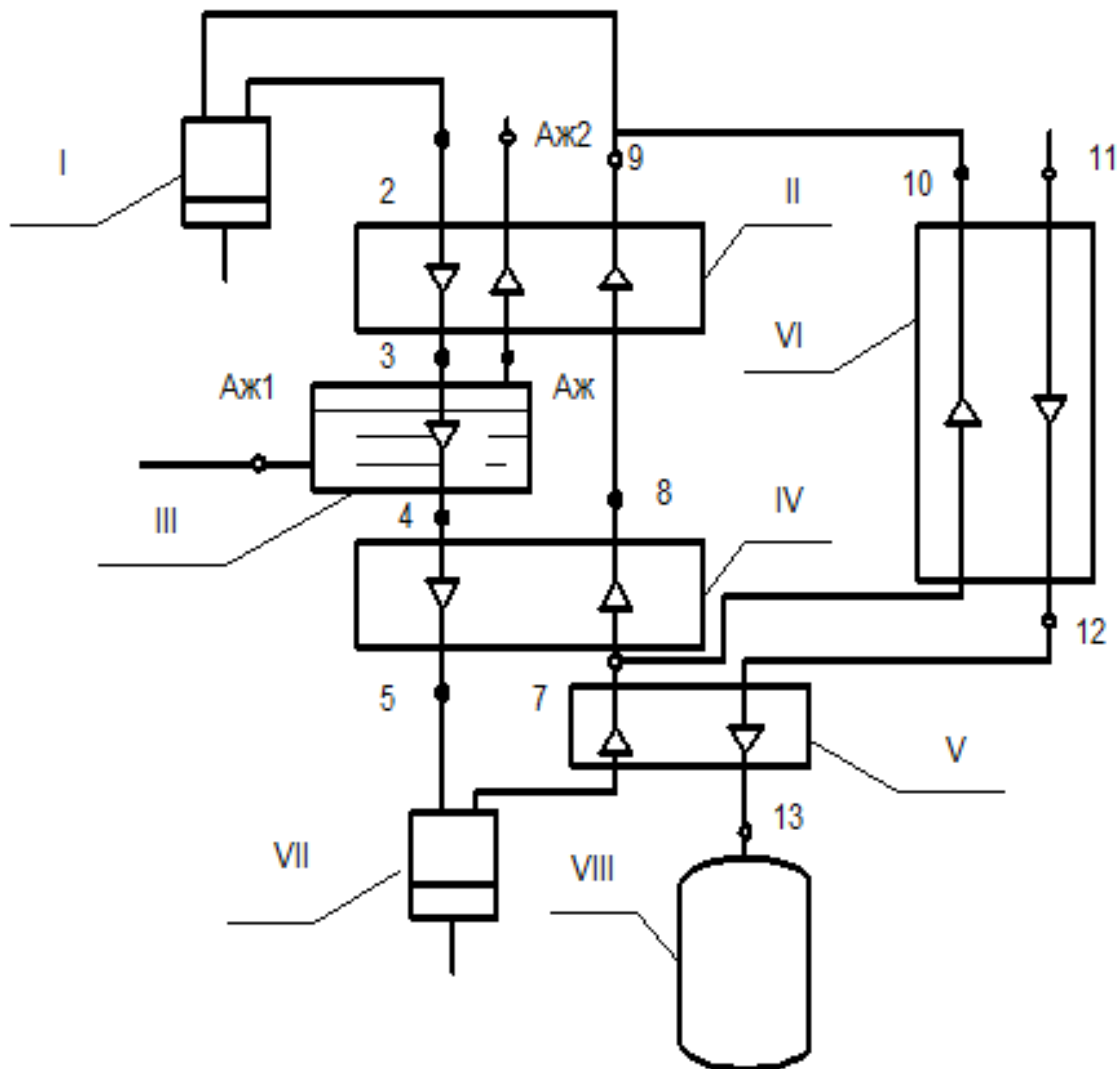


Рисунок 5.1 Принципова схема зріджувача гелію при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням зовнішнього навантаження (зріджувача неону)

I-компресор; II-попередній теплообмінник; III-азотна ванна;
 IV-Теплообмінник; V-конденсатор; VI-теплообмінник; VII-детандер;
 VIII-ємність для неону

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

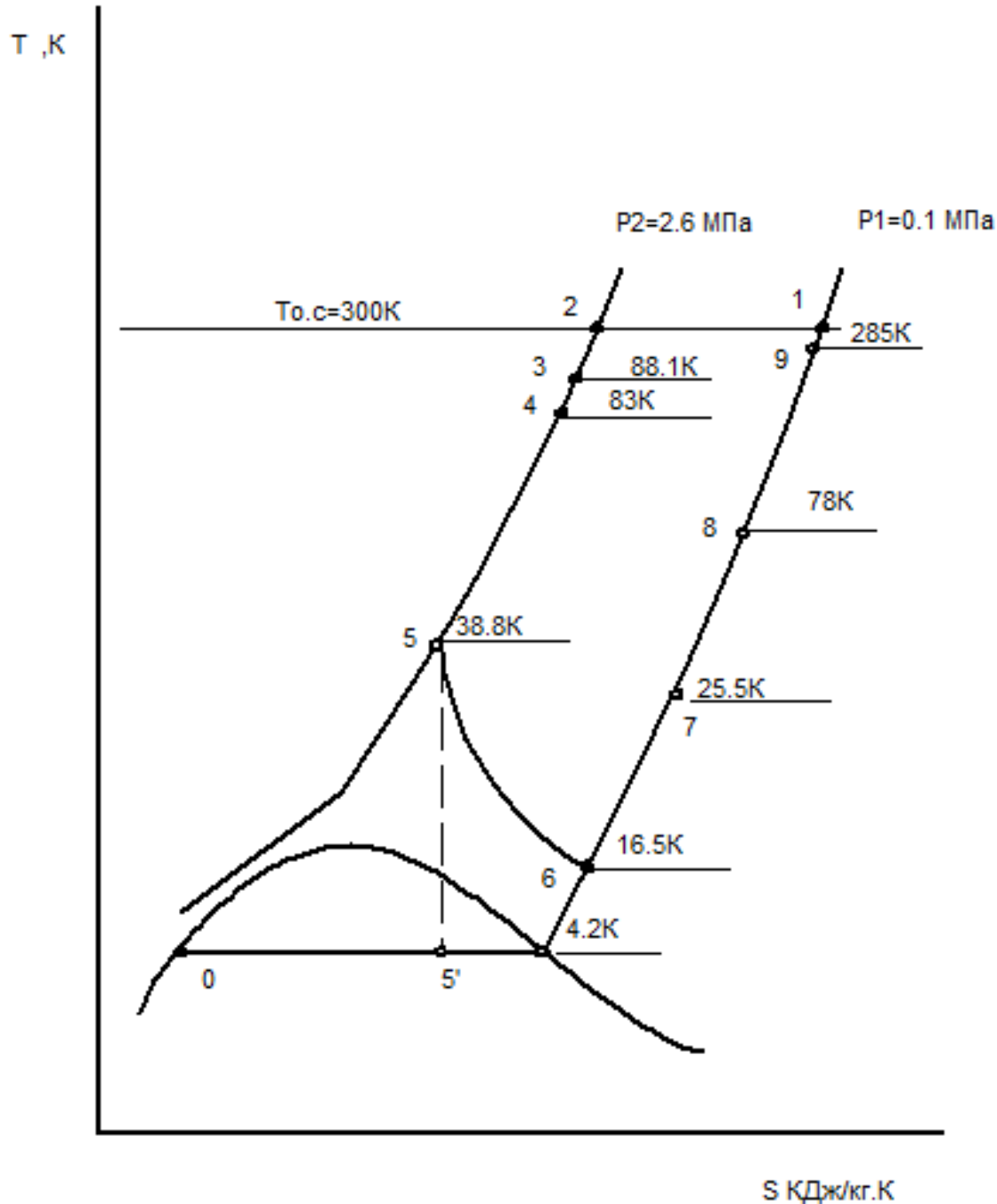


Рисунок 5.2 T-S- діаграма циклу гелієвого зріджувача при роботі в рефрижераторному режимі з підключенням зовнішнього навантаження (зріджувача неону)

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

5.3 Теплоприпливи з навколишнього середовища

Дані теплоприпливи обрані за даними таблиці 1.6[1]:

для детандерного гелієвого циклу - 0.013 від $(i_4 - i_7)$;

для циклу рідкого азоту - 0.02 $(i_2 - i_4)$;

для неоновового зріджувача - $(0.013 + 0.04)$ від $(i_{10} - i_7)$.

5.4 Визначення температури гелію за детандером.

На початковій стадії розрахунку задаємося значеннями частки зворотного потоку гелію $G_{зв}$: 80%, 85%, 87%, 87.5%, 87.8%, 88%, 89%, 90%.

Для цих восьми режимів визначаємо значення параметрів основних точок процесу. Для визначення параметрів гелію на виході з детандера необхідно визначити параметри на вході в детандер.

Параметри гелію на вході в детандер визначаються з енергетичного балансу теплообмінника (IV).

$$i_4 + G_{об} \times i_7 + q_3^{T \leftarrow T_4} = i_5 + G_{об} \times i_8 \quad (5.1)$$

звідки
$$i_5 = i_4 + G_{об}(i_7 - i_7) + q_3^{T \leftarrow T_4} \quad (5.2)$$

При розрахунку кожного з восьми режимів величина теплоприпливу розраховується індивідуально для кожного режиму і визначається за формулою:

$$q_3^{T \leftarrow T_4} = 0.013(i_4 - i_7) \quad (5.3)$$

Недорекуперацію на теплому кінці теплообмінника (IV) приймаємо рівною 5K та $T_8 = T_4 - \Delta T = 83 - 5 = 78K$

Для визначення температури після детандера скористаємося виразом визначення адіабатичного К.П.Д. детандера:

$$\eta_{АД} = \frac{i_5 - i_6}{i_5 - i_{5'}} \quad (5.4)$$

з цього виразу приймаючи адіабатичний К.П.Д. детандера рівним 0.8 визначимо i_6 для кожного з восьми режимів.

$$i_6 = i_5 - \eta_{\text{АД}}(i_5 - i_{5'}) \quad (5.5)$$

Усі отримані значення заносяться до таблиці В1.

5.5 Визначення холодопродуктивності

Для визначення холодопродуктивності необхідно задатися недорекуперацією на теплому кінці теплообмінника (V) $\Delta T = 1.7\text{K}$. При температурі кипіння неону $T_{\text{Ne}} = 27.2\text{K}$ температура на виході з теплообмінника становитиме $T_7 = 25.5\text{K}$.

Холодопродуктивність визначається за формулою

$$Q_0 = G_{\text{He}}^{\text{K}}(i_7 - i_6) - q_3^{T < T_7}. \quad (5.6)$$

де: $q_3^{T < T_7}$ -теплоприпливи до теплообмінника (V).

$$q_3^{T < T_7} = 0.013(i_6 - i_7) \quad (5.7)$$

Розрахунок теплоприпливів проводиться для кожного з восьми режимів. Отримані значення холодопродуктивності заносимо до таблиці В1.

5.6 Визначення продуктивності рідкого неону

Продуктивність рідкого неону визначається за формулою:

$$G_{\text{Ne}} = Q_0 / r_{\text{Ne}} \quad (5.8)$$

де: r_{Ne} -теплота пароутворення неону

$r_{\text{Ne}} = 86.24 \text{ КДж/кг}$

Розрахунок проводиться для всіх режимів. Отримані значення заносимо до таблиці 5.1.

5.7 Визначення температури зворотного потоку гелію на виході з теплообмінника (VI)

Температура T_{10} визначається з енергетичного балансу теплообмінника (VI). Складемо енергетичний баланс теплообмінника (VI):

$$i_7 \times g_{OBR} + G_{Ne} \times i_{11} + q_3^{T < 280K} = i_{10} \times g_{OBR} + i_{12} \times G_{Ne} \quad (5.9)$$

де: g_{OBR} - частка зворотного потоку гелію через зріджувач неону.

$$g_{OBR} = G_{He} - G_{OBR} \quad (5.10)$$

звідки визначимо i_{10}

$$i_{10} = \frac{i_7 \times g_{OBR} + G_{Ne} \times i_{11} + q_3^{T < 280K} - i_{12} \times G_{Ne}}{g_{OBR}} \quad (5.11)$$

де: $q_3^{T < 280K}$ - теплоприпливи до теплообмінника (VI)

$$q_3^{T < 280K} = (0.013 + 0.04) \times (i_{10} - i_7) \times g_{OBR} \quad (5.12)$$

Розрахунок теплоприпливів здійснюється для кожного режиму індивідуально. Отримані значення температур заносимо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1-Параметри основних точок процесу

Частка ПОТОКУ $G_{OBR}, \%$	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		1	2	3	4
80	T, K	300.0	300.0	88.1	83.0
	P, Мпа	0.10	2.60	2.60	2.60
	I, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.K	31.5	29.7	18.4	18.0

85	Т,К	300.0	300.0	88.1	83.0
	Р, МПа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.4	18.0
87	Т,К	300.0	300.0	88.1	83.0
	Р, МПа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.4	18.0
87.5	Т,К	300.0	300.0	88.1	83.0
	Р, МПа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.4	18.0
88	Т,К	300.0	300.0	88.1	83.0
	Р, МПа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.4	18.0
89	Т,К	300.0	300.0	88.1	83.0
	Р, МПа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.4	18.0
90	Т,К	300.0	300.0	88.1	83.0
	Р, МПа	0.10	2.60	2.60	2.60
	І, КДж/кг	1577.9	1530.3	478.9	451.6
	S, КДж/кг.К	31.5	29.7	18.4	18.0

Продовження таблиці 5.1

Частка ПОТОКУ G _{ОБР} , %	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		5	6	7	8
80	Т,К	42.6	18.5	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	236.9	109.9	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	14.5	16.6	18.3	24.1
85	Т,К	40.2	17.1	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	223.3	102.9	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	14.1	16.2	18.3	24.1
87	Т,К	39.2	16.8	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	217.8	101.7	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	14.0	16.1	18.3	24.1
87.5	Т,К	39.0	16.73	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	216.4	101.4	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	14.0	16.1	18.3	24.1
87.8	Т,К	38.8	16.5	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	215.6	99.3	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	13.9	16.0	18.3	24.1
88	Т,К	38.8	16.5	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	215.1	99.2	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	13.9	16.0	18.3	24.1

89	Т,К	38.2	16.4	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	212.4	98.6	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	13.9	16.0	18.3	24.1
90	Т,К	37.7	16.3	25.5	78.0
	Р, Мпа	2.60	0.12	0.12	0.12
	І, КДж/кг	209.6	98.0	146.7	420.0
	S, КДж/кг.К	13.8	15.9	18.3	24.1

Продовження таблиці 5.1

Частка ПОТОКУ G _{ОБР} , %	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		9	10	11	12
80	Т,К	285.0	143.0	300.0	27.2
	Р, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	І, КДж/кг	1495.0	777.1	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	27.8	7.2	4.7
85	Т,К	285.0	223.0	300.0	27.2
	Р, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	І, КДж/кг	1495.0	1173.9	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	30.0	7.2	4.7
87	Т,К	285.0	255	300.0	27.2
	Р, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10

	I, КДж/кг	1495.2	1338.6	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	30.5	7.2	4.7
87.5	T, К	285.0	265.0	300.0	27.2
	P, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	I, КДж/кг	1495.0	1393.3	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	30.8	7.2	4.7
87.8	T, К	285.0	281.0	300.0	27.2
	P, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	I, КДж/кг	1495.0	1476.8	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	31.6	7.2	4.7
88	T, К	285.0	288.0	300.0	27.2
	P, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	I, КДж/кг	1495.0	1510.9	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	31.3	7.2	4.7
89	T, К	285.0	315.0	300.0	27.2
	P, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	I, КДж/кг	1495.0	1651.5	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	31.7	7.2	4.7
90	T, К	285.0	346.0	300.0	27.2
	P, Мпа	0.10	0.10	0.10	0.10
	I, КДж/кг	1495.0	1814.1	401.6	118.8
	S, КДж/кг.К	31.2	32.2	7.2	4.7

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

63

Продовження таблиці 5.1

Частка ПОТОКУ $G_{\text{ОБР}}$, %	ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ПРОЦЕСУ			
		13	5'	Q_0 Вт	G_{Ne} м ³ /ГОД
80	Т,К	27.2	12.5	647.69	30.04
	Р, Мпа	0.10	0.12		
	І, КДж/кг	32.9	78.2		
	S, КДж/кг.К	1.5	14.5		
85	Т,К	27.2	11.5	772.76	35.84
	Р, Мпа	0.10	0.12		
	І, КДж/кг	32.9	72.8		
	S, КДж/кг.К	1.5	14.1		
87	Т,К	27.2	11.4	793.70	36.80
	Р, Мпа	0.10	0.12		
	І, КДж/кг	32.9	72.7		
	S, КДж/кг.К	1.5	14.0		
87.5	Т,К	27.2	11.3	800.27	37.12
	Р, Мпа	0.10	0.12		
	І, КДж/кг	32.9	72.7		
	S, КДж/кг.К	1.5	14.0		
87.8	Т,К	27.2	11.2	836.50	38.81
	Р, Мпа	0.10	0.12		
	І, КДж/кг	32.9	70.3		
	S, КДж/кг.К	1.5	13.9		
88	Т,К	27.2	11.1	838.08	38.84
	Р, Мпа	0.10	0.12		
	І, КДж/кг	32.9	70.3		
	S, КДж/кг.К	1.571	13.990		

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

КРМ.КТ.2.631-03.1.16

Лист

64

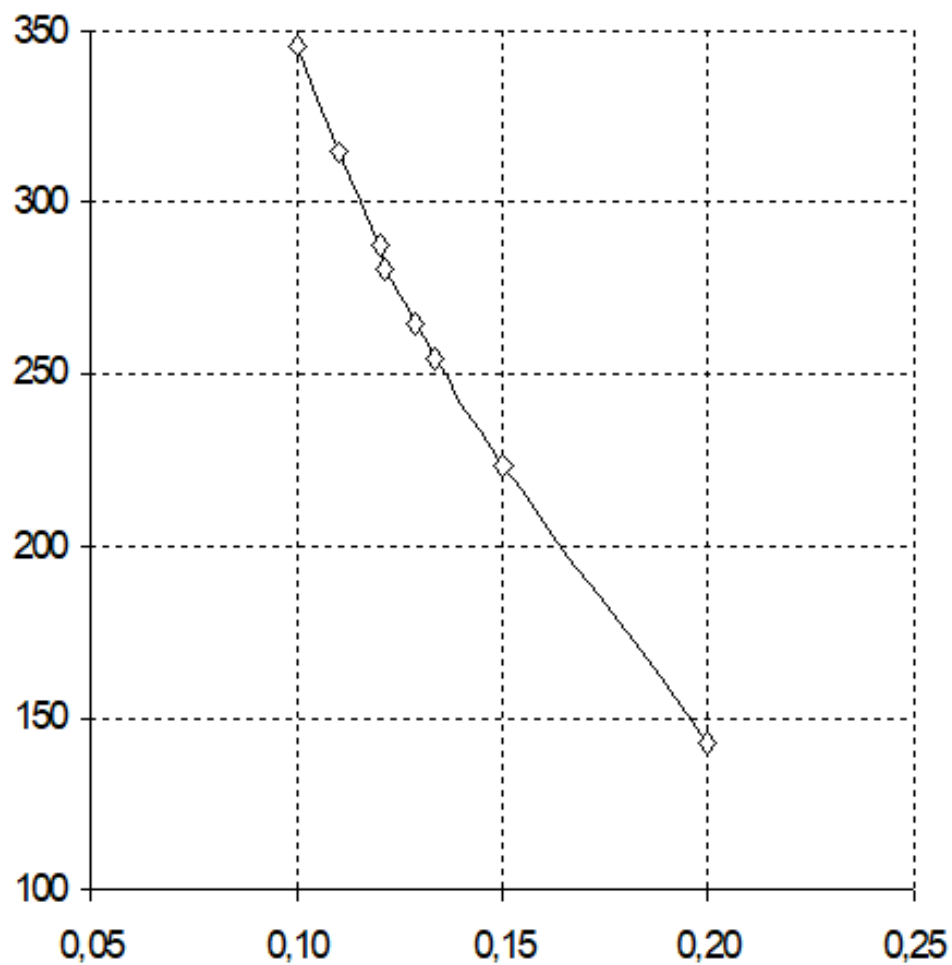
89	T, К	27.2	11.0	849.87	39.44
	P, Мпа	0.10	0.12		
	I, КДж/кг	32.9	70.1		
	S, КДж/кг.К	1.5	13.9		
90	T, К	27.2	10.9	860.04	39.88
	P, Мпа	0.10	0.12		
	I, КДж/кг	32.9	70.1		
	S, КДж/кг.К	1.5	13.8		

З урахуванням введеного обмеження на температуру зворотного потоку гелію, що проходить через зріджувач, на виході з теплообмінника $T_{10} = 280\text{К}$ витрата зворотного потоку через зріджувач склала 12.2% від загального потоку гелію. При цьому режимі кількість зріджуваного неону склала 34.92 кг/год. або 28.96 л/год рідкого неону.

З отриманих розрахункових даних наведених у таблиці 5.1 побудовані залежності: $T_{10}(g_{\text{OBR}})$ (рисунок 5.3); $G_{\text{Ne}}(g_{\text{OBR}})$ (рисунок 5.4); $Q_{\text{O}}(g_{\text{OBR}})$ (рисунок В5.5).

Паралельно було проведено розрахунок гелієвого зріджувача із зовнішнім навантаженням (зріджувач неону) без урахування теплоприпливів, та частка зворотного потоку гелію на зріджувач, з урахуванням обмеження температури становила 12%. З урахуванням цього можна зробити висновок, що втрати від теплоприпливів перебивають 0.2% потоку гелію.

T_{10}, K



Частка потоку на зріджувач

Рисунок 5.3 Залежність температури гелію T_{10} на виході зі зріджувача від частки зворотного потоку, що подається в зріджувач

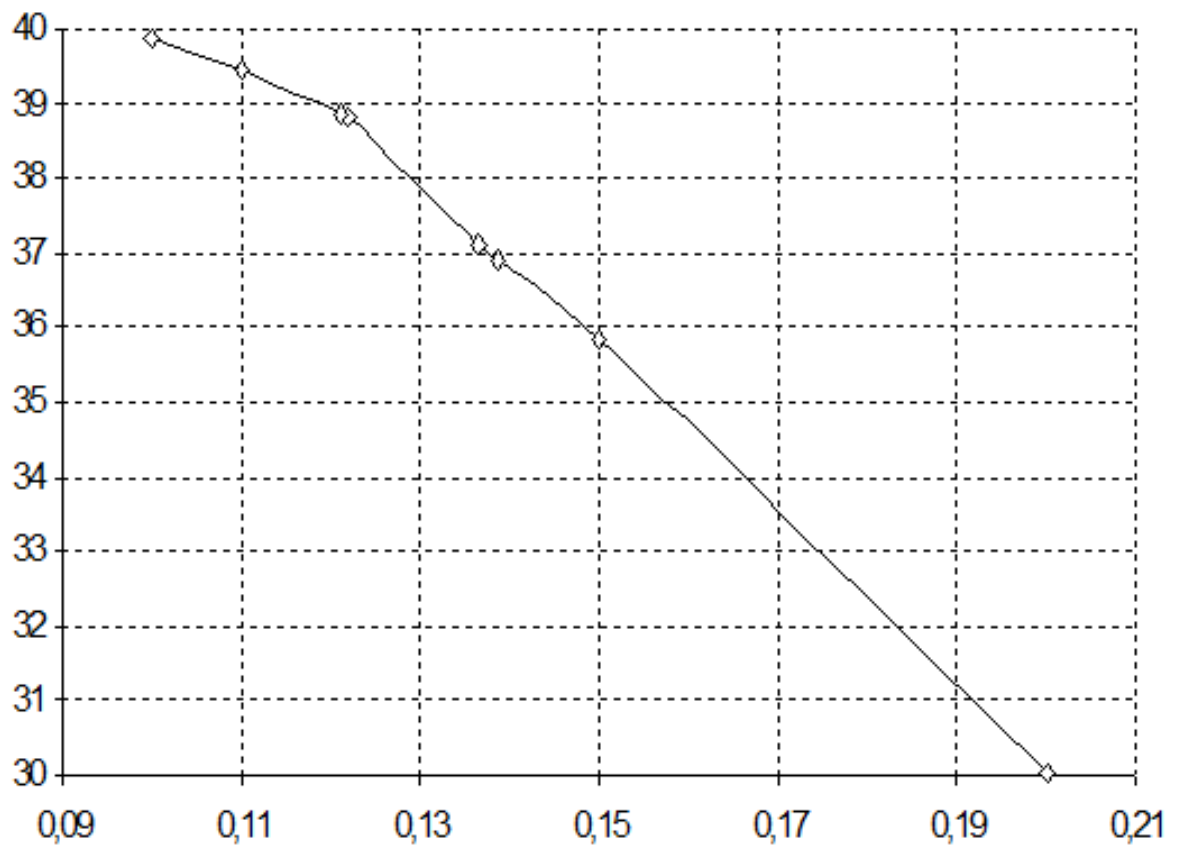
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

66

G_{Ne} , м³/ГОД



Частка потоку на зріджувач

Рисунок 5.4 Залежність продуктивності по неону G_{Ne} від частки зворотного потоку, що подається на зріджувач

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

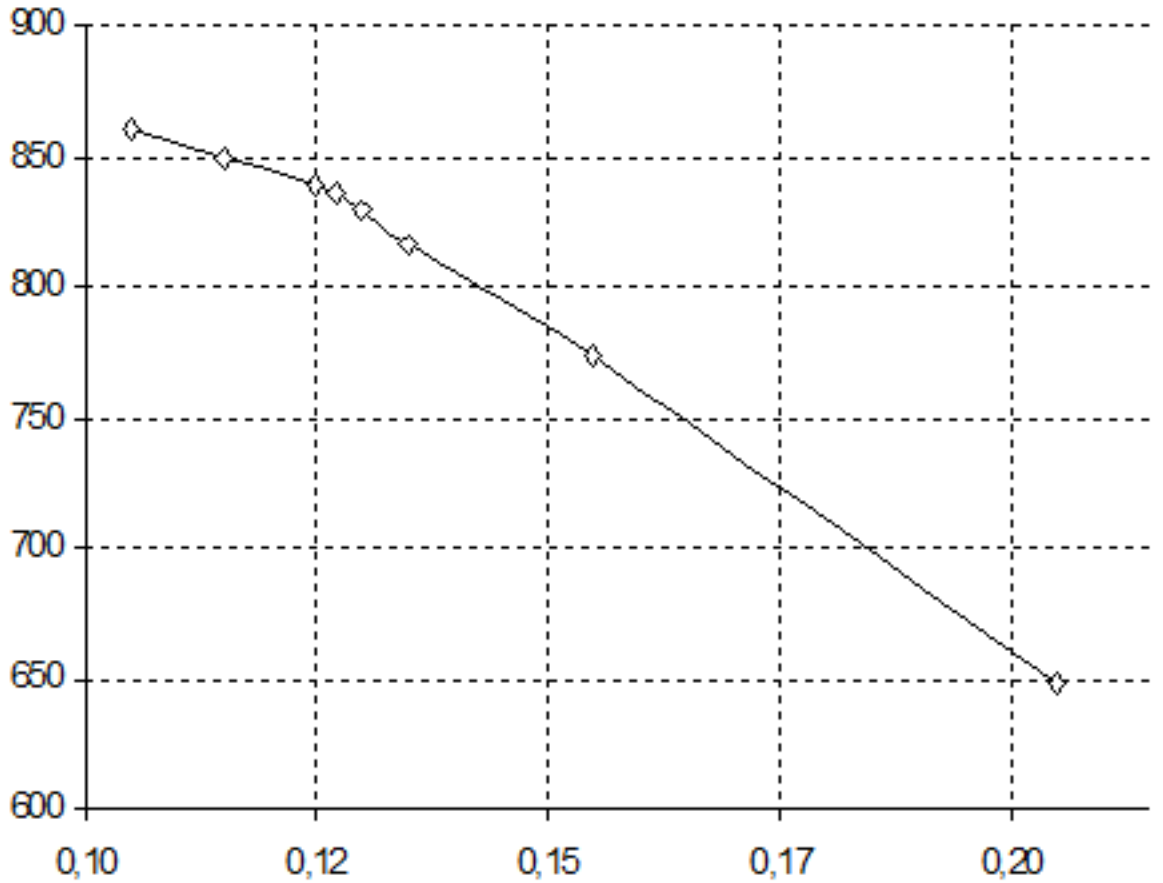
KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

67

Холодопродуктивність

Q, Вт



Частка потоку на зріджувач

Ривунок 5.5 Залежність холодопродуктивності Q від частки потоку, що направляється на зріджувач

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

KPM.KT.2.631-03.1.16

Лист

68

5.8 Визначення ступеня термодинамічної досконалості.

Визначення ступеня термодинамічної досконалості виконуємо за формулою:

$$\eta_T = \varepsilon_P / \varepsilon_C = \varepsilon_P \left(\frac{T_{н.с}}{T_X} - 1 \right) \quad (5.13)$$

де: ε_P – холодильний коефіцієнт реального циклу;

$T_{н.с} = 300$ К - температура навколишнього середовища;

$T_X = 25.5$ К - температура термостатування;

Визначимо холодильний коефіцієнт реального циклу за формулою:

$$\varepsilon = \frac{q_X}{L} = \frac{q_X}{\frac{R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - h_S \cdot \eta_S \cdot \eta_{МЕХ}}{\eta_{ІЗ}}} \quad (5.14)$$

де: $\eta_{ІЗ} = 0.6$ – ізотермічний ККД компресора;

$\eta_{МЕХ} = 0.8$ – механічний ККД детандера;

$R = 2.078$ кДж/(кг К) – постійна газова гелію;

Підставивши всі необхідні дані у формулу (5.14) отримаємо:

$$\varepsilon_P = 0.014;$$

Підставивши всі необхідні дані у формулу (5.14) отримаємо:

$$\eta_T = 0.15$$

5.9 Визначення витрат енергії

Для визначення витрат електроенергії приймаємо розрахункове значення ізотермічного ККД гелієвого компресора рівним 60%. Витрату енергії отримання рідкого азоту приймаємо рівним 1.2 кВт год /л.рід.N₂ (4.32 МДж/л рід. N₂). Тоді розрахункова витрата може бути визначена за формулою:

$$L_{ЗАГ} = L - L_{ДЕТ} + L_{АЗ}, \text{ кВт} \quad (5.15)$$

де: L – енергія, яка витрачається компресором, кВт;

$L_{\text{ДЕТ}}$ – енергія, що повертається детандером, кВт;

$L_{\text{АЗ}}$ – енергія витрачається отримання рідкого азоту, кВт;

Визначимо енергію, що витрачається компресором за формулою:

$$L = \frac{G_{\text{He}} \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{\text{ІЗ}} \cdot 3600}, \text{ кВт} \quad (5.16)$$

де: $\eta_{\text{ІЗ}} = 0.6$ - ізотермічний ККД компресора;

$R = 2.08$ кДж/кг К - газова стала для гелію;

$T_1 = 300$ К – температура довкілля;

P_1 і P_2 – відповідно тиск початку та кінця стиснення, МПа;

$P_1 = 0.1$ МПа;

$P_2 = 2.6$ МПа;

$G_{\text{He}} = 64.24$ кг/годину;

При розрахунку питомої витрати енергії на зрідження гелію не враховуються додаткові витрати, пов'язані з витратою енергії на роботу вакуум-насосів зріджувача, витратою рідкого азоту на блок очищення гелію і т.п.

Підставивши всі необхідні значення формулу (5.16) отримаємо:

$L = 60.4$ кВт;

Визначимо енергію, що повертається детандером за формулою:

$$L_{\text{ДЕТ}} = (G_{\text{He}} \cdot (i_5 - i_6) \cdot \eta_{\text{М}}) / 3600, \text{ кВт}; \quad (5.17)$$

де: $\eta_{\text{М}} = 0.9$;

Підставивши всі необхідні значення формулу (5.17) отримаємо:

$L_{\text{ДЕТ}} = 1.866$ кВт;

Визначимо витрати потужності на охолодження гелію в азотній ванні.

$$L_{A,B} = \frac{A_{Ж} \cdot L_{N_2} \cdot 10^3}{\rho_{N_2} \cdot 3600}, \text{ кВт} \quad (5.18)$$

де: $A_{Ж}$ -кількість рідкого азоту, кг / год;

$$A_{Ж} = 17.8 \text{ кг/годину};$$

$\rho_{N_2} = 0.804 \text{ кг/л}$ - густина рідкого азоту;

$L_{N_2} = 4.32 \text{ МДж/л.рід.}N_2$ – витрата енергії отримання рідкого азоту;

Підставивши всі необхідні значення у формулу (5.18) отримаємо:

$$L_{A,B} = 26.6 \text{ кВт};$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (5.15) отримаємо значення енергії, що витрачаються при роботі в рефрижераторному режимі при підключенні зріджувача неону.

$$L = 85.2 \text{ кВт};$$

Визначимо мінімальну роботу зрідження неону за формулою:

$$L_{\min} = T_0 \cdot (S_{11} - S_{13}) - (i_{11} - i_{13}), \text{ кДж/кг} \quad (5.19)$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (5.19) отримаємо значення мінімальної роботи зрідження неону:

$$L_{\min} = 1338.7 \text{ кДж/кг};$$

При витраті неону $G_{Ne} = 34.92 \text{ кг/год}$ мінімальна робота зрідження становитиме: $L = 12.9 \text{ кВт}$.

Далі гелій надходить у блок очищення гелію від газоподібних домішок. Спочатку гелій потрапляє в теплообмінник, де охолоджується зворотним потоком очищеного гелію та парами азоту, що надходять із резервуару апарату очищення.

З теплообміннику прямий потік гелію направляється в апарат очищення гелію (7), адсорбер апарату очищення заповнений активованим вугіллям та розміщений у резервуарі з рідким азотом. В апараті очищення гелій звільняється від повітря та інших газоподібних домішок. Очищений гелій повертається в теплообмінник (8), де нагрівається прямим потоком приблизно до температури навколишнього середовища.

Після теплообміннику гелій проходить через фільтр (9), де очищається від віднесеного з адсорбера вугільного пилу, і направляється в агрегат охолодження.

Стиснутий та очищений гелій з тиском приблизно 25 кгс/см² та температурою навколишнього середовища надходить в агрегат охолодження. Основна частина гелію направляється в трубки теплообмінника I (17), решта гелію (7% в режимі очікування) - в трубки теплообмінника II (18). У першому теплообміннику гелій охолоджується зворотним потоком гелію, у другому парами азоту, що надходять із азотної ванни (19). Обидва потоки охолоджуються приблизно до температури 90К і, вийшовши з теплообмінників, змішуються, після чого гелій надходить в азотну ванну (19). Розподіл і регулювання потоків гелію у зазначених теплообмінниках здійснюється вентилем 3-12 подачі прямого потоку в теплообмінник II в залежності від температури вихідного азоту на теплому кінці цього теплообмінника. Температура азоту вимірюється термометром Т-2 і має бути нижчою на 18-20° ніж температура прямого потоку в точці Т-1.

У азотній ванні гелій охолоджується до температури приблизно 80К за рахунок холоду киплячого азоту. Рівень рідкого азоту у ванні контролюється дискретним покажчиком рівня Н₁, розташованому на щиті арматури та К.І.П

температури, близьких до розрахункових, вентиль 3-1 закривається та останні теплообмінники починають працювати у нормальному режимі.

Внутрішня порожнина блоку охолодження, де розташована апаратура, знаходиться під вакуумом. Абсолютний тиск у цьому просторі, у теплих умовах, становить $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст.

У газгольдері (46) зберігаються запаси низького тиску гелію для компенсації витоків гелію в компресорі. Одночасно газгольдер є буферною ємністю для пом'якшення коливань тиску на всмоктуванні при роботі поршневого гелієвого компресора та при змінах режиму на установці, що створює надлишковий тиск на всмоктуванні гелієвого компресора 200-300 мм.вод.ст.

Підживлення системи гелієм при заохолодженні установки та в режимі зрідження здійснюється з рампи (47), у балонах якої гелій зберігається при тиску до 150 кгс/см^2 . Під час зупинок установки надлишок гелію закачується у балон додаткової рампи основним компресором. Олива з оливовідокремлювача зливається в бачок продувок (44), в якому відокремлюється, зливається в колектор продувок (45). До цього колектора приєднані також продувальні лінії оливовідокремлювач (2), фільтра (3) і проміжних ступенів основного компресора. З колектора продувок олива зливається в дренаж, а гелій з залишками оливи надходить в останній оливовідокремлювач (41), в якому газоподібний гелій відокремлюється і надходить у газгольдер, а олива зливається в дренаж.

Установка комплектується осушувачем гелію та блоком очищення гелію від газоподібних домішок. Періодично обидва блоки піддаються регенерації. До складу установки входять два механічні вакуумні насоси та високовакуумний агрегат. Один з механічних вакуумних насосів (51) призначений обслуговувати осушувач та блок очищення гелію. Насос застосовується при регенерації осушувача та для видалення десорбованих газів при регенерації вугілля. Крім того, цей насос використовується для вакуумування гелієвих порожнин

установки перед заповненням системи гелієм після монтажу або ремонту. Другий механічний насос (38) разом із високовакуумним агрегатом (37) використовується для відновлення вакууму в ізоляційних кожухах блоку охолодження та зливних сифонів. Вакуумування ізоляційних кожухів проводиться до залишкового тиску $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. при температурі довкілля у всіх частинах апарату. Цим же механічним насосом (38) здійснюється вакуумування внутрішньої порожнини блоку охолодження, в якій розташовані теплообмінники, збирач гелію та детандер; вакуумується порожнина до залишкового тиску $1 \cdot 10^{-1} - 1$ мм.рт.ст. При такому вакуумі в порожнині значно зменшуються припливи тепла від тепліших до холодніших частин блоку охолодження завдяки зменшенню конвенції залишкових газів. Цим самим механічним насосом (38) вакуумуються гелієві транспортні судини (35 і 36) перед зливом в них рідкого гелію. При такому вакуумі в порожнині значно зменшуються припливи тепла від тепліших до холодніших частин блоку охолодження завдяки зменшенню конвенції залишкових газів.

Рідкий азот в азотну ванну блоку охолодження подається з цистерни. Друга така посудина забезпечує рідким азотом блок очищення гелію.

Установка комплектується діафрагмою (53), встановленої на лінії зворотнього потоку з блоку охолодження. Діафрагма використовується епізодично за необхідності вимірювання продуктивності гелієвого компресору. Середній перепад тиску діафрагми становить 250 мм.вод.ст. при витраті 360 м³/год гелію.

Для вимірювання перепаду тиску на діафрагмі рекомендується використовувати звичайний скляний U-подібний дифманометр, заповнений трикрезилфосфатом або іншою ідентичною рідиною. У показниках приладу слід враховувати виправлення на густину рідини. Запірні вентиля на діафрагмі (3-23 і 3-24) слід відкривати лише на час виміру, щоб уникнути попадання рідини та її пари в гелієву систему.

					<i>KPM.KT.2.631-03.1.16</i>	Лист
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат		77

7 РОЗРАХУНОК ЗРІДЖУВАЧА НЕОНУ

7.1 Розрахунок конденсатора неону

7.1.1 Вихідні дані:

Теплове навантаження	$Q = 836,5 \text{ Вт}$
Температура конденсації неону	$T_{\text{Ne}} = 27.2 \text{ К}$
Кількість циркулюючого гелію	$V = 0.1 \text{ м}^3/\text{с}$
Кількість неону, що конденсується	$V = 0.01078 \text{ м}^3/\text{с}$
Діаметр труби	10x1 мм
Температура гелію на вході в конденсатор	$T_6 = 16.5 \text{ К}$
Температура гелію на виході з конденсатора	$T_7 = 25.5 \text{ К}$

7.1.2 Мета розрахунку:

Метою розрахунку є визначення площі поверхні теплообміну конденсатора, коефіцієнта теплопередачі апарату коефіцієнта тепловіддачі неону, а також розробка конструкції самого конденсатора.

7.1.3 Визначення коефіцієнта тепловіддачі від стінки труби до гелію

3.1 Визначимо недорекуперацію на теплому кінці теплообмінника

$$\Delta T = T_{12} - T_7 \quad (7.1.1)$$

де: T_{12} - температура неону на вході в конденсатор,

$$\Delta T = 27.2 - 25.5 = 1.7\text{К} \quad (7.1.2)$$

3.2 Визначимо різницю температур потоків на холодному кінці конденсатора

$$\Delta T = T_{13} - T_6 \quad (7.1.3)$$

Звідки $\Delta T = 27.2 - 16.5 = 10.7\text{K}$ (7.1.4)

3.3 Покажемо зміну температур робочих середовищ у конденсаторі (рисунок 7.1)

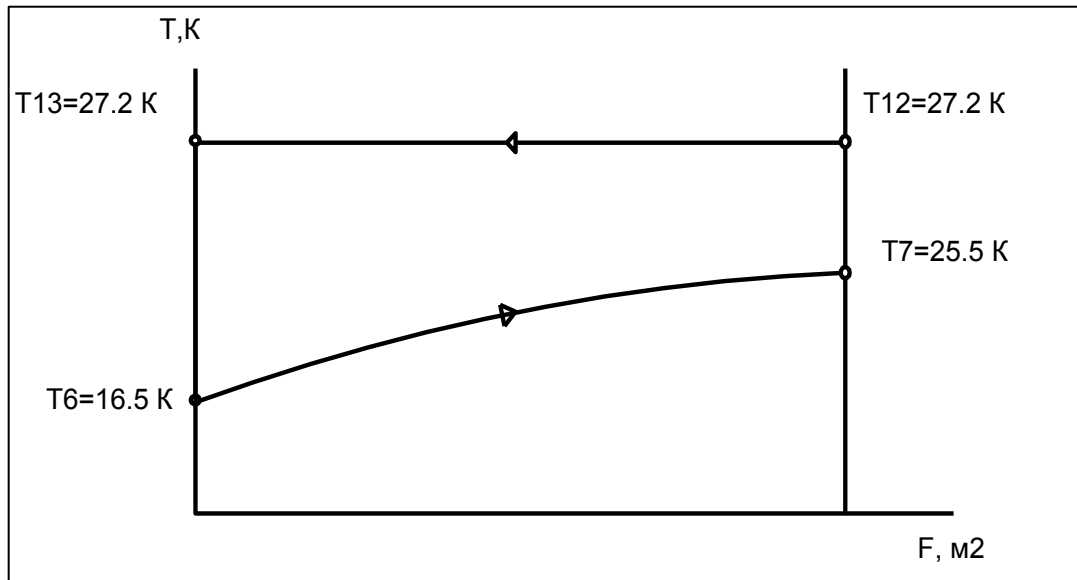


Рисунок 7.1 Зміна температур робочих середовищ у конденсаторі.

3.4 Знаходимо середню логарифмічну різницю між температурами неону, що конденсується, і гелію, що нагрівається, тобто середній температурний напір.

$$Q_T = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (7.1.5)$$

Звідки $Q = \frac{10.7 - 1.7}{\ln \frac{10.7}{1.7}}$ (7.1.6)

3.5 Визначаємо теплофізичні властивості гелію за середньої температури гелію.

$$T_{Г,СР} = 0.5(T_6 + T_7) \quad (7.1.7)$$

$$T_{Г,СР} = 0.5(16.5 + 25.5) = 21 \quad (7.1.8)$$

ν – кінематична в'язкість $\text{м}^2/\text{с}$

$$\nu = 95.1947 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{кг К})$

$$\lambda = 0.039973 \text{ Вт}/(\text{кг К})$$

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

$C_{p\Gamma}$ - теплоємність гелію, КДж / (кг К)

$$C_{p\Gamma} = 5.242 \text{ КДж/(кг К)}$$

μ_{Γ} – динамічна в'язкість, Па с

$$\mu_{\Gamma} = 2.651 \times 10^{-6} \text{ Па с}$$

3.6 Визначаємо критерій Прандтля

$$Pr_{\Gamma} = \frac{C_{p\Gamma} \mu_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}} \quad (7.1.9)$$

звідки $Pr_{\Gamma} = \frac{5242 \cdot 2.651 \cdot 10^{-6}}{0.039973} = 0.34$ (7.1.10)

3.7 Визначаємо критерій Рейнольдса

$$Re_{\Gamma} = \frac{\rho \omega \cdot d_{BH}}{\mu_{\Gamma}} \quad (7.1.11)$$

де: $\rho \omega$ -масова швидкість руху гелію, кг/м²с

$$\rho \omega = 30.079 \text{ кг/м}^2\text{с}$$

d_{BH} -внутрішній діаметр трубки, м

$$d_{BH} = d_H - 2S \quad (7.1.12)$$

d_H -зовнішній діаметр трубки, м

$$d_H = 0.01 \text{ м}$$

S -товщина стінки трубки, м

$$S = 0.001 \text{ м}$$

$$d_{BH} = 0.01 - 2 \cdot 0.001 = 0.008 \text{ м} \quad (7.1.13)$$

$$Re_{\Gamma} = \frac{30.079 \cdot 0.008}{2.651 \cdot 10^{-6}} = 90770 \quad (7.1.14)$$

3.8 Визначаємо число Нусельта

$$Nu_{\Gamma} = 0.023 \cdot Re_{\Gamma}^{0.8} Pr_{\Gamma}^{0.4} \quad (7.1.15)$$

$$Nu_{\Gamma} = 0.023 \cdot 90770^{0.8} \cdot 0.34^{0.4} = 138.25 \quad (7.1.16)$$

тоді коефіцієнта тепловіддачі від стінки труби до гелію визначається за такою формулою:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{Nu_{\Gamma} \cdot \lambda}{d_{BH}} \quad (7.1.17)$$

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{138.25 \cdot 0.039973}{0.008} = 691.2 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (7.1.18)$$

7.1.4 Визначаємо щільність теплового потоку від неону, що конденсується, до гелію віднесену до внутрішньої поверхні труби

Для цього в координатах q, Q будуємо графіки залежності $q_{\Gamma} = f(Q_{\Gamma})$ та $q_{H} = f(Q_{H})$

де: q_{Γ} і q_{H} – щільність теплового потоку від стінки труби до гелію та від неону до стінки труби, віднесені до F_{BH} ;

F_{BH} - внутрішня площа трубки, м²;

Q_{Γ}, Q_{H} - різниця між температурами стінки та гелію, а також неону та стінки, тобто часткові температурні напори.

Під час передачі теплоти від зовнішньої стінки труби з температурою t_{CT} до гелію (з урахуванням термічного опору стінки).

$$q_{\Gamma} = \frac{t_{CT} - t_{\Gamma}}{\frac{1}{\alpha_{\Gamma}} + \frac{\delta_{TP}}{\lambda_{TP}}} \quad (7.1.19)$$

де:

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки трубки, Вт/(м К)

$\lambda = 217.7$ Вт/(м К))

$$q_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{\frac{1}{691.2} + \frac{0.001}{217.7}} = 689 Q_{\Gamma} \quad (7.1.20)$$

Рівняння (7.1.20) в координатах q, Q зображується прямою лінією, для побудови якої приймаємо $Q_{\Gamma} = 2\text{К}$, тоді:

$$q_{\Gamma} = 1378 \text{ Вт/м}^2$$

Будуємо графік $q_{\Gamma} = f(Q_{\Gamma})$ (рисунок 7.2)

Щільність теплового потоку від неону до зовнішньої поверхні труб визначається за такою формулою:

$$q_{H} = \alpha_{H} (t_{H} - t_{CT}) = \alpha_{N} Q_{H} \quad (7.1.21)$$

Коефіцієнт тепловіддачі для неону, що конденсується на пучку вертикальних труб, за відсутності впливу швидкості руху газу визначається за формулою:

$$\alpha_H = 1.15 \sqrt[4]{\frac{\gamma \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3 \cdot g}{\eta \cdot H \cdot \Delta T}} \quad (7.1.22)$$

де: γ – теплота конденсації, Дж/кг;

ρ - густина рідини, кг/м³;

λ -коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);

g -прискорення сили тяжіння, м/с²;

η -коефіцієнт динамічної в'язкості, кг/м с;

H – висота труби, м;

$$\Delta t = t_s - t_H = \Theta_H \quad (7.1.23)$$

Θ_H – різниця між температурою конденсації та температурою стінки, К;

Визначальною температурою для знаходження ρ , λ та η є середня температура плівки конденсату, яку приймаємо приблизно рівною $T_{Ne}=27.2$ К, оскільки температура стінки невідома, а при знайдений $\Theta = 4.892$ К різниця між температурами стінки та конденсації мало позначиться на величинах.

$\gamma = 86232$, Дж/кг;

$\rho = 1205$, кг/м³;

$\lambda = 717 \times 10^{-5}$, Вт/(м К);

$g = 9.81$ м/с²;

$\eta = 4.555 \times 10^{-7}$, кг/м;

$H = 0.5$ м;

Підставивши всі необхідні значення у формулу (7.1.22) отримаємо вираз:

$$\alpha_H = 767.89 \sqrt[4]{\Theta_H} \quad (7.1.24)$$

Щільність теплового потоку від неону до стінки, віднесена до внутрішньої поверхні труби:

$$q_{H.BH} = \alpha \cdot \frac{F_H}{F_{BH}} = \alpha \cdot \frac{d_H}{d_{BH}} \quad (7.1.25)$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (7.1.25) отримаємо вираз:

$$q_{H.VH} = 959.86 \cdot \Theta_H^3 \quad (7.1.26)$$

Задаємося декількома значеннями Θ_H та знаходимо відповідні їм $q_{H.VH}$, отримані значення наведені у таблиці 7.1.1

За результатами цих обчислень на тому ж малюнку 7.1.2 будуюмо криву залежності (7.1.26). Враховуючи що:

$$Q_{\Gamma} + Q_H = Q_T \quad (7.1.26)$$

Величини Q_{Γ} і Q_H – при побудові відкладаються з різних сторін горизонтального відрізка, рівного Q_T , ординату точки перетину прямої (7.1.20) та кривої (7.1.26) на рисунку 7.2, дорівнює пошуковій щільності теплового потоку $q=1780 \text{ Вт/м}^2$

Відрізки, що відсікаються на осі абсцис перпендикуляром, опущеним з точки перетину, відповідають температурним напорам $Q_{\Gamma}=2.55 \text{ К}$ і $Q_H=2.342 \text{ К}$

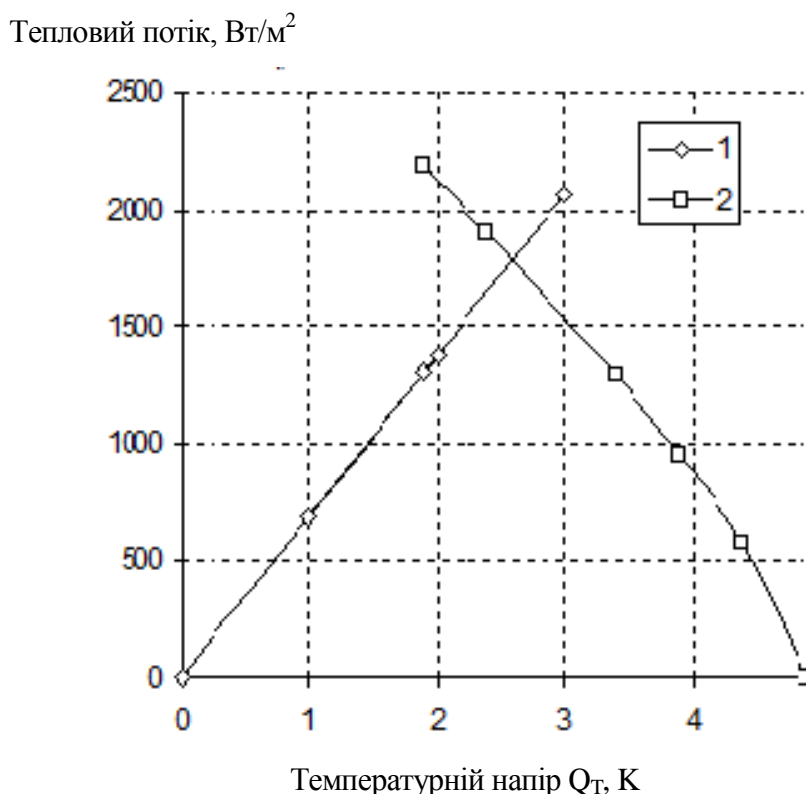


Рисунок 7.2 Графічний метод визначення теплового потоку та часткових температурних напорів: 1 - залежність $q_{\Gamma} = 689 Q_{\Gamma}$; 2 - залежність $q_H = 959,86 Q_H^3$

Таблиця 7.1 Залежність питомого теплового потоку від питомого теплового напору.

Q_H, K	0.5	1.0	1.5	2.5	3.0
$Q_H^{3/4}, K$	0.595	1.000	1.352	1.988	2.280
$q_{H,ВН}, Вт/м^2$	571.12	959.86	1297.7	1908.21	2188

7.1.5 Визначаємо площу поверхні конденсатора

$$F_{ВН} = \frac{\eta \cdot Q}{q_{ВН}} \quad (7.1.27)$$

де: η – коефіцієнт запасу поверхні;

$$\eta = 1.6 \div 1.8;$$

Підставивши всі необхідні значення формулу (7.1.27) отримаємо:

$$F_{ВН} = 0.845 \text{ м}^2;$$

7.1.6 Коефіцієнт теплопередачі апарата, віднесений до внутрішньої поверхні труб

$$K_{ВН} = \frac{q}{Q_T} \quad (7.1.28)$$

Підставивши всі необхідні значення формулу (7.1.28) отримаємо:

$$K_{ВН} = 363.8 \text{ Вт/м}^2 \text{ К};$$

7.1.7 Коефіцієнт тепловіддачі конденсується на пучку труб неону

$$\alpha_H = \frac{q \cdot F_{ВН}}{Q_H \cdot F} \quad (7.1.29)$$

Підставивши всі необхідні значення формулу (7.1.29) отримаємо:

$$\alpha_H = 608 \text{ Вт/м}^2 \text{ К};$$

7.1.8 Визначаємо кількість трубок у конденсаторі

$$n = \frac{F_{ВН}}{F_{ВН,ТР}} \quad (7.1.30)$$

де: $F_{ВН}$ – внутрішня поверхня трубки, m^2 ;

$$F_{ВН.ТР} = \pi \cdot d_{ВН} \cdot H \quad (7.1.31)$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (7.1.31) отримаємо:

$$F_{ВН.ТР} = 0.0125 \text{ м}^2;$$

Підставивши всі необхідні значення у формулу (7.1.30) отримаємо:

$$n = 67;$$

Конструктивно конденсатор є пучок труб, які на кінцях з'єднані тороподібними колекторами. Пучок розташовується у вертикальному положенні та розміщений у корпусі зріджувача. Потік гелію подається до нижнього колектора і відводиться з верхнього.

7.1.9 Визначення діаметра колектора

Приймаємо відстань між центрами трубок, що дорівнює $t = 30$ мм.

Приймаємо як колектор мідну трубу 20x1 мм.

Визначаємо довжину колектора

$$L = t \cdot n \quad (7.1.32)$$

Підставивши всі необхідні значення формулу (7.1.32) отримаємо:

$$L = 2010 \text{ мм};$$

Визначаємо діаметр колектора

$$D = L/\pi \quad (7.1.33)$$

Підставивши всі необхідні значення формулу (7.1.33) отримаємо:

$$D = 639 \text{ мм};$$

Приймаємо діаметр збірника рідкого неону рівним $D_{СБ} = 1000$ мм.

7.2 Розрахунок теплообмінника зріджувача неону

Вихідні дані:

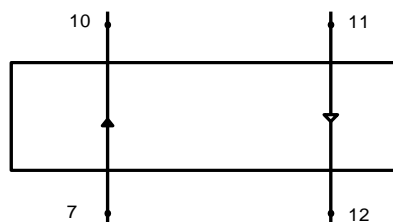
Витрата гелію	$V_{\text{He}}^{\text{ОБР}}=43.92 \text{ м}^3/\text{ГОД}$
Витрата неону	$V_{\text{Ne}}^{\text{ІПР}}=38.81 \text{ м}^3/\text{ГОД}$
Тиск гелію	$P_{\text{ОБР}} = 0.12 \text{ МПа}$
Тиск неону	$P_{\text{ІПР}} = 0.12 \text{ МПа}$
Температура гелію на вході в теплообмінник	$T_7 = 25.5 \text{ К}$
Температура гелію на виході з теплообмінника	$T_{10} = 280 \text{ К}$
Температура неону на вході в теплообмінник	$T_{11} = 300 \text{ К}$
Температура неону на виході з теплообмінника	$T_{12} = 27.2 \text{ К}$
Теплопритоки через ізоляцію віднесені до 1 м^3 гелію.	$q_3=12.5 \text{ кДж/м}^3$
Втрата тиску на потоці гелію	$\Delta P^{\text{ОБР}} = 0.02 \text{ МПа}$
Втрата тиску на потоці неону	$\Delta P^{\text{ІПР}} = 0.02 \text{ МПа}$

Мета розрахунку:

Розрахувати коефіцієнти тепловіддачі та теплопередачі, середню різницю температур між гелієм та неоном у двопотоковому витому теплообміннику. Визначити поверхню теплообміну, діаметр та довжину намотування, кількість шарів та скласти таблицю намотування теплообмінника. Виконати також гідравлічний розрахунок.

7.2.1 Енергетичний баланс теплообмінника

Схема апарату та розташування розрахункових точок показано на рис. 7.2.1



Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат
----	-----	----------	-------	-----

Складемо енергетичний баланс теплообмінника

$$G_{GH}(i_{11} - i_{12}) + Q_3 = G_{OBR}(i_{10} - i_7) = Q \quad (7.2.1)$$

де: $G_{ГПР}$ та G_{OBR} – масові витрати прямого та зворотного потоків;

$i_7, i_{10}, i_{11}, i_{12}$ – величини масової ентальпії у відповідних точках;

Q_3 - теплопритоки через ізоляцію;

Q – теплове навантаження теплообмінника;

$$G_{ГПР} = V_{ГПР} \cdot \rho_{ГПР} \quad (7.2.2)$$

$$G_{OBR} = V_{OBR} \cdot \rho_{OBR} \quad (7.2.3)$$

де: $\rho_{ГПР}$ і ρ_{OBR} - щільність неону і гелію за нормальних умов;

За довідником [11] визначаємо:

$$\rho_{ГПР} = 0.899 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{OBR} = 0.178 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{тоді: } G_{ГПР} = 34.924 \text{ кг/годину};$$

$$G_{OBR} = 7.838 \text{ кг/годину};$$

За таблицями термодинамічних властивостей неону та гелію знайдемо:

$$i_{11} = 401.6 \text{ кДж/кг};$$

$$i_{12} = 118.8 \text{ кДж/кг};$$

$$i_{10} = 1476.8 \text{ кДж/кг};$$

$$i_7 = 146.7 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_3 = q_3 \cdot V_{OBR} \quad (7.2.4)$$

$$Q = 549 \text{ кДж/кг};$$

Підставляючи відомі величини (7.2.1) отримаємо:

$$Q = 10425.5 \text{ кДж/годину};$$

7.2.2 Визначення коефіцієнта теплопередачі

Так як тиск гелію в трубному просторі $P = 0.12$ МПа то вибираємо мідну трубку оребрену дротом 4×0.4 мм (тобто внутрішній і зовнішній діаметри

трубок $d_1 = 3.2$ мм, $d_2 = 4$ мм), масову швидкість гелію в трубках $\omega_1\rho_1 = 40$ кг/м²с, швидкість неону в міжтрубному просторі $\omega_2\rho_2 = 20$ кг/м²с.

Параметри прямого та зворотного потоків визначимо за їх середніми температурами:

$$T_{CP}^{PP} = \frac{T_{11} + T_{12}}{2} \quad (7.2.5)$$

$$T_{CP}^{OBP} = \frac{T_{10} + T_7}{2} \quad (7.2.6)$$

звідки: $T_{CP}^{PP} = 163.60$ К;

$T_{CP}^{OBP} = 152.75$ К;

Знайдені за таблицями теплофізичних властивостей неону та гелію значення питомого обсягу, теплоємності, в'язкості та теплопровідності зведено до таблиці 7.2.1.

Таблиця 7.2.1 - Значення теплофізичних властивостей гелію та неону

ГАЗ	P, МПа	T, К	V, дм ³ /кг	Cp, КДж/кг	λ, Вт/мК	μx10 ⁶ (Нс)/м ²
ГЕЛІЙ	0.12	152.75	3125	5.19	98.2x10 ⁻³	12.5
НЕОН	0.12	163.6	663	1.03	31.9x10 ⁻³	20.669

Для визначення режиму перебігу гелію у трубному просторі знайдемо величину критерію Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1}{\mu_1} \quad (7.2.7)$$

де: $\mu_1 = 12.5 \times 10^{-6}$ Нс/м² – динамічна в'язкість гелію;

Підставивши необхідні значення отримаємо:

$Re = 10240$.

Критичне значення числа Рейнольдса для трубного простору визначимо за такою формулою:

$$Re_{KPI} = 2300 \cdot \left[1 + 8.6 \left(\frac{d_1}{D_{CP}} \right)^{0.45} \right] \quad (7.2.8)$$

де: D_{CP} - середній діаметр навивки, мм;

Приймаючи $D_{CP}=250$ мм, отримаємо:

$$Re_{KP1} = 5082$$

З порівняння величин Re і Re_{KP1} видно, що $Re > Re_{KP1}$ тобто трубному просторі встановиться розвинене турбулентний рух.

В цьому випадку критерій Нуссельта визначається:

$$Nu_1 = 0.023 \cdot Re_1^{0.8} \cdot Pr_1^{0.4} \cdot \varepsilon \quad (7.2.9)$$

де Pr -критерій Прандтля;

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 \cdot Cp_1}{\lambda_1} \quad (7.2.10)$$

де: $\lambda_1 = 98,2 \times 10^{-3}$ Вт/мК-коефіцієнт теплопровідності гелію;

$Cp = 5.19$ КДж / кг - теплоємність гелію;

Підставивши необхідні значення отримаємо:

$$Pr = 0.661$$

ε - Коефіцієнт, що враховує кривизну трубок;

$$\varepsilon = 1 + 3.54 \frac{d_1}{D_{CP}} \quad (7.2.11)$$

Підставивши необхідні значення отримаємо:

$$\varepsilon = 1.045$$

Підставивши значення ε і Pr (7.2.9) отримаємо:

$$Nu = 32.89$$

Коефіцієнт тепловіддачі від труби до гелію, Вт/м²К:

$$\alpha_1 = Nu \cdot \frac{\lambda_1}{d_1} \quad (7.2.12)$$

Підставивши необхідні значення отримаємо:

$$\alpha_1 = 1009.5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

Визначимо величину критерію Рейнольдса у міжтрубному просторі:

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot \rho_2 \cdot d_2}{\mu_2} \quad (7.2.13)$$

де: $\mu_2 = 20.669 \times 10^{-6}$ Нс/м² – динамічна в'язкість неону;

d_E -ефективний діаметр навивки, м;

$d_E = 0.00119$ м, вибираємо з таблиці 6.2 сторінка 417 [8];

Підставивши необхідні значення отримаємо:

$$Re_2 = 1151$$

Коефіцієнт тепловіддачі міжтрубного потоку:

$$\alpha_M = 168 \cdot Re_2^{-0.3} \cdot \omega_2 \rho_2 \cdot Cp_2 \cdot Pr_2^{-\frac{2}{3}} \cdot A \quad (7.2.14)$$

де: $Cp = 1.03$ КДж / кг - теплоємність неону;

A -коефіцієнт оребрення або відношення ореброваної поверхні до гладкої;

$$A = (d_2 + d_{PP} \cdot l_{PP}) / d_2 \quad (7.2.15)$$

де: $d_{PP} = 0.8$ мм – діаметр дроту, вибираємо із таблиці 6.2 сторінка 417 [8];

$t_{PP} = 2.5$ мм – крок навивки дроту, вибираємо з таблиці 6.2 сторінка 417 [8];

l_{PP} – довжина тяганини на один погонний метр прямої труби, м;

$$l_{PP} = \sqrt{[\pi \cdot (d_2 + d_{PP})^2] + t_{PP}^2} \cdot \frac{1}{t_{PP}} \quad (7.2.16)$$

Підставивши необхідні значення отримаємо:

$$l_{PP} = 3.55 \text{ м}$$

Підставивши необхідні значення (7.2.15) отримаємо:

$$A = 1.71$$

Визначимо критерій Прандтля для міжтрубного потоку:

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 \cdot Cp_2}{\lambda_2} \quad (7.2.17)$$

де: $\mu_2 = 20.669$ Нс/м² – динамічна в'язкість неону;

$\lambda_1 = 31.9 \times 10^{-3}$ Вт/мК-коефіцієнт теплопровідності неону;

$Cp = 1.03$ КДж / кг - теплоємність неону;

Підставивши необхідні значення (7.2.17) отримаємо:

$$Pr_2 = 0.666$$

Підставивши необхідні значення (7.2.14) отримаємо:

$$\alpha_2 = 936.5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

Коефіцієнт теплопередачі від трубного потоку до міжтрубного потоку

$$K = \frac{1}{\left[\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2} \right]} \quad (7.2.18)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.18) отримаємо:

$$K=433.6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

7.2.3 Визначення середньої різниці температур

Запишемо в таблицю 7.2.2 значення ентальпії неону за відповідного тиску у всьому діапазоні робочих температур. Ізобар прямого потоку потоку будемо за даними таблиці 7.2.2. За відомими температурами наносимо точки 10 і 7 і з'єднуємо їх прямою, яка є ізобару зворотного потоку.

Таблиця 7.2.2-Значення ентальпії прямого потоку в робочому діапазоні температур.

Т,К	$i_{\text{ПР}}, \text{кДж/кг}$	$\Delta i = i_1 - i_{\text{ПР}}, \text{кДж/кг}$
27.2	118.8	282.8
50	143.6	258.0
70	164.4	237.2
90	185.1	216.5
110	205.7	195.9
130	226.4	175.2
150	247.0	154.6
170	267.6	134.0
190	288.2	113.4
210	308.85	92.8
230	329.9	71.7
250	350.7	50.9
270	370.6	3.1
290	391.6	10
300	401.6	0

Середньоінтегральна різниця температур ΔT_{CP} визначимо графоаналітичним способом за допомогою діаграми $(i_1-i_{TP}) T$ (рис. 7.2.2).

Все теплове навантаження апарату розбиваємо на сім рівних частин та визначаємо середні різниці температур ΔT_i кожній ділянці та заносимо до таблиці 7.2.3.

Таблиця 7.2.3 – Значення ΔT_i на ділянках теплообмінника.

НОМЕР ДІЛЯНКИ	1	2	3	4	5	6	7
ΔT_i	9	7	6	4.5	3	2	1.5

Підставимо отримані значення ΔT_i до рівняння (7.2.19)

$$\Delta T = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta T} \right)} \quad (7.2.19)$$

і отримаємо $\Delta T = 3.267 \text{ K}$

7.2.4 Визначення кількості трубок у теплообміннику

Кількість трубок у теплообміннику визначаємо за формулою:

$$n = \frac{4 \cdot G_{TP}}{\omega_1 \rho_1 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (7.2.20)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.20) отримаємо:

$n = 6.7$ трубок;

Приймаємо кількість трубок, що дорівнює $n = 9$, що призведе до зменшення величини масової швидкості $\omega_1 \rho_1 = 30.079 \text{ кг/м}^2$. Зменшення величини масової швидкості призводить до необхідності уточнення величини критерію Рейнольдса, коефіцієнта тепловіддачі труби до гелію, критерію Нуссельта, коефіцієнта теплопередачі від трубного потоку до міжтрубного потоку.

Критерій Рейнольдса для нової величини масової швидкості становитиме $Re = 7700$

Критерій Нуссельта складе $Nu = 26.1$

Визначаємо середню довжину однієї трубки теплообмінника за формулою:

$$l_{TP} = \frac{F}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{TP}} \quad (7.2.26)$$

$$l_{TP} = \frac{3.02}{3.14 \cdot 0.004 \cdot 9} = 26.727 \text{ м} \quad (7.2.27)$$

Визначаємо теоретичну довжину навивки за формулою:

$$H = \frac{l_{TP}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\text{tg}^2 \beta}}} \quad (7.2.28)$$

де:

$$\text{tg} \beta = \frac{n \cdot \sigma_2 \cdot d_2}{\pi \cdot z(D_{CP} + z \cdot \sigma_1 \cdot d_2)} \quad (7.2.29)$$

σ_1 - відносний осьовий крок;

$$\sigma_1 = t_1 / d_2 \quad (7.2.30)$$

$t_1 = 4$ мм; t_1 - середній осьовий крок, мм;

$$\sigma_1 = 4/4 = 1 \quad (7.2.31)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.29) отримаємо:

$$\text{tg} \beta = 0.0186;$$

Підставивши необхідні значення (7.2.28) отримаємо:

$$H = 0.498 \text{ м};$$

Визначаємо число витків трубки у шарі, за формулою:

$$nB = H / (n \text{ ЗАХ} \times t_1) \quad (7.2.32)$$

Визначаємо довжину трубки у шарі, за формулою:

$$L_i = H \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot D_{CP}^i}{d_2 \cdot n_i \cdot \sigma_1} \right)^2} \quad (7.2.33)$$

Отримані дані заносимо до таблиці 7.2.4

Таблиця 7.2.4 - Параметри навивки теплообмінника.

ШАР	СЕРЕДНІЙ ДІАМЕТР ШАР D_{CP} , м	ЗАХІД- НІСТ $n_{ЗАХ}$	ЗОВНІШНІЙ ДІАМЕТР ШАР D_N , м	ЧИСЛО ВИТКІВ n_B	ДОВЖИНА ТРУБИ L , м
1	0.184	2	0.191	62.2	28.17
2	0.194	2	0.201	62.2	29.73
3	0.204	2	0.211	62.2	31.26
4	0.214	3	0.221	41.5	21.90

7.2.7 Гідравлічний розрахунок теплообмінника

7.2.7.1 Трубний потік.

Визначимо величину змійковості за формулою:

$$K = d_2 / D_H \quad (7.2.34)$$

$$K = 0.0032 / 0.221.8 = 0.014 \quad (7.2.35)$$

Визначимо число Діна за такою формулою:

$$De = Re \cdot \sqrt{K} \quad (7.2.36)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.36) отримаємо:

$$De = 924.5$$

Визначимо коефіцієнт гідравлічного опору за формулою:

$$\xi = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (7.2.37)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.37) отримаємо:

$$\xi = 0.0337$$

Визначення коефіцієнта гідравлічного опору від змійковості за формулою:

$$\xi_{3M} = \xi \frac{0.276 \left(\frac{d_1}{D_H} \right)^{0.121} \cdot Re^{0.0895}}{2.549 + \lg Re} \quad (7.2.38)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.38) отримаємо:

$$\xi_{3M} = 0.00197;$$

Визначення гідравлічного опору трубного потоку за формулою:

$$\Delta P = \xi_{3M} \frac{(\omega_1 \rho_1)^2}{2 \cdot d_1 \cdot \rho_1} \cdot l_{TP} \quad (7.2.39)$$

Підставивши необхідні значення (7.2.39) отримаємо:

$$\Delta P = 0.019 \text{ МПа};$$

7.2.7.2 Міжтрубний потік

Визначення гідравлічного опору міжтрубного потоку за формулою:

$$\Delta P_M = C \cdot Re_M^n \frac{(\omega_2 \rho_2)^2}{2 \cdot f_M \cdot \rho_2} \cdot F \cdot A \quad (7.2.40)$$

$$\text{де: } \xi = 2.65; n = -0.3;$$

f_M - площа вільного перерізу, м^2 ;

$$f_M = 0.7854 (D_H - D_{\text{СЕР}}) \quad (7.2.41)$$

$$f_M = 0.01023 \text{ м}^2;$$

$A = 1.71$; A – коефіцієнт ребра;

Підставивши необхідні значення (7.2.40) отримаємо:

$$\Delta P_M = 0.016 \text{ МПа}$$

8 РОЗПОДІЛ ПОТОКІВ У ТЕПЛООБМІННИКАХ, ПОПЕРЕДНЬОМУ СТУПЕНІ ОХОЛОДЖЕННЯ, ГІЛІСВОМУ ЗРІДЖУВАЧІ

Вихідні дані:

Тиск прямого потоку	$P_{\text{ПР}} = 2.60 \text{ МПа}$
Тиск зворотного потоку	$P_{\text{ОБР}} = 0.10 \text{ МПа}$
Тиск азоту, що відходить	$P_A = 0.10 \text{ МПа}$
Витрата зворотного потоку	$V_{\text{ОБР}} = 316,08 \text{ м}^3/\text{ГОД}$
Витрата прямого потоку	$V_{\text{ПР}} = 360 \text{ м}^3 / \text{ГОД}$
Температура прямого потоку на вході в теплообмінник	$T_2 = 300 \text{ К}$
Температура прямого потоку на виході з теплообмінника	$T_3 = 88.1 \text{ К}$
Температура зворотного потоку на вході в теплообмінник	$T_9 = 285.0 \text{ К}$
Температура зворотного потоку на виході з теплообмінника	$T_8 = 78.0 \text{ К}$
Температура азоту на вході в теплообмінник	$T_{A1} = 77.3 \text{ К}$
Температура азоту на виході з теплообмінника	$T_{A2} = 285 \text{ К}$
Теплоприпливи	$q_3 = 10.5 \text{ КДж/кг}$

Мета розрахунку:

Необхідно розрахувати частки прямого потоку гелію, визначити витрату азоту під час підключення зріджувача неону.

1 Визначення часток прямого потоку гелію, що розбивається для подачі в теплообмінники.

Схема підключення теплообмінників представлена на рисунку 8.1.

Ця схема підключення теплообмінників є аналогічною трипоточному теплообміннику, але простіше у виготовленні та розрахунках.

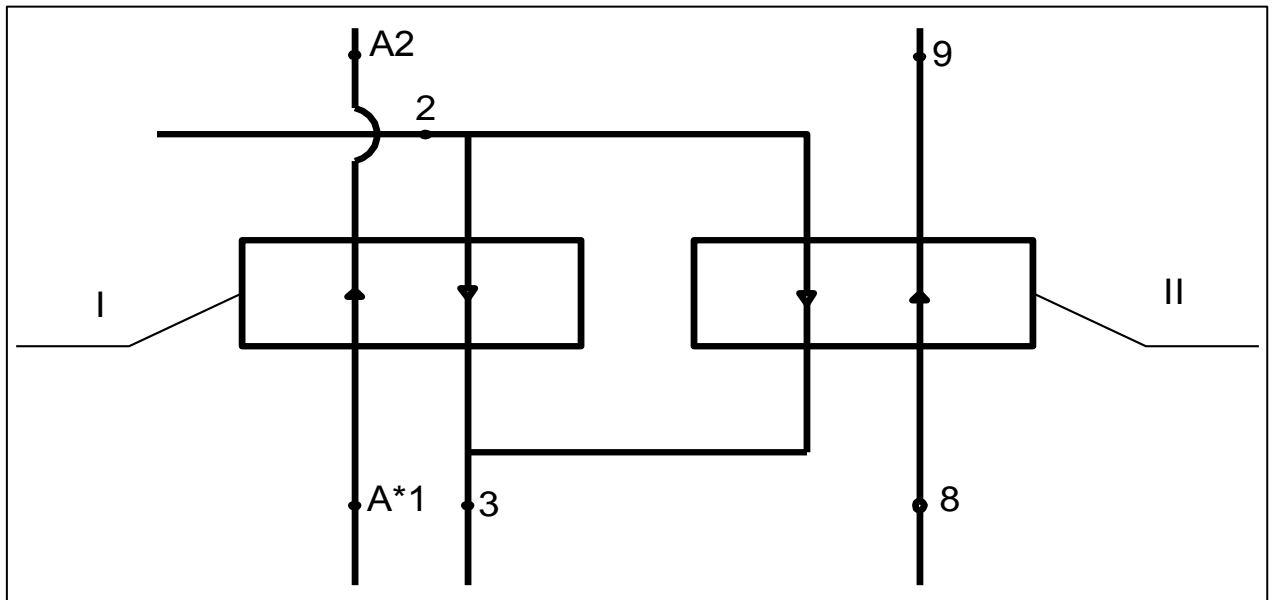


Рисунок 8.1. Схема підключення теплообмінників.

Складемо енергетичний баланс II теплообмінника.

$$G_{\text{ПР}}^{\text{II}} \cdot i_2 + G_{\text{ОБР}} \cdot i_8 + 0.5 \cdot q_3 \cdot G_{\text{ПР}} = i_9 \cdot G_{\text{ОБР}} + i_3 \cdot G_{\text{ПР}}^{\text{II}} \quad (8.1)$$

де: $G_{\text{ПР}}^{\text{II}}$ - витрата прямого потоку через теплообмінник II;

$$G_{\text{ПР}} = V_{\text{ПР}} \times \rho_{\text{ПР}} \quad (8.2)$$

$\rho_{\text{ПР}} = 0.178 \text{ кг/м}^3$ – густина гелію прямого потоку;

$$G_{\text{ПР}} = 360 \times 0.178 = 64.24 \text{ кг/год} \quad (8.3)$$

$$G_{\text{ОБР}} = V_{\text{ОБР}} \times \rho_{\text{ОБР}} \quad (8.4)$$

$$G_{\text{ОБР}} = 316.08 \times 0.178 = 56.4 \text{ кг/год} \quad (8.5)$$

$G_{\text{ПР}}$ - Витрата прямого потоку, кг/год;

$G_{\text{ОБР}}$ - витрата зворотного потоку, кг/год;

Параметри вузлових точок представлені у таблиці 8.1

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

Таблиця 8.1 – Параметри вузлових точок процесу.

Номер точки	P, МПа	T, К	S, КДж/кгК	I, КДж/кг
2	2.60	300.0	24.7	1530.3
3	2.60	88.1	18.4	478.9
8	0.11	78.0	24.1	420.0
9	0.10	285.0	31.2	1495.0
A1*	0.10	77.3	5.4	125.0
A2	0.10	285.0	6.8	550.0

Визначимо $G_{\text{ПР}}^{\text{II}}$ для II теплообмінника

$$G_{\text{ПР}}^{\text{II}} = \frac{G_{\text{ОБР}}(i_9 - i_8) - 0.5 \cdot (q_3 \cdot G_{\text{ПР}})}{i_2 - i_3} \quad (8.6)$$

$$G_{\text{ПР}}^{\text{II}} = \frac{56.408 \cdot (1495.0 - 420.0) - 0.5 \cdot (10.5 \cdot 64.24)}{1530.3 - 478.9} = 57.34 \text{ кг/ГОД} \quad (8.7)$$

Визначимо $G_{\text{ПР}}^{\text{I}}$ для I теплообмінника

$$G_{\text{ПР}}^{\text{I}} = G_{\text{ПР}} - G_{\text{ПР}}^{\text{II}} \quad (8.8)$$

$$G_{\text{ПР}}^{\text{I}} = 64.24 - 57.34 = 6.89 \text{ кг/ГОД} \quad (8.9)$$

2 Визначення витрати азоту через теплообмінник I

Складемо енергетичний баланс I теплообмінника

$$G_{\text{ПР}}^{\text{I}} \cdot i_2 + G_{\text{A}} \cdot i_{\text{A1}} + 0.5 \cdot q_3 \cdot G_{\text{ПР}} = G_{\text{ГН}}^{\text{I}} \cdot i_3 + G_{\text{A}} \cdot i_{\text{A2}} \quad (8.10)$$

звідки

$$G_{\text{A}} = \frac{G_{\text{ПР}}^{\text{I}}(i_3 - i_2) - 0.5(q_3 \cdot G_{\text{ПР}})}{(i_{\text{A1}^*} - i_{\text{A2}})}, \text{ кг/ГОД} \quad (8.11)$$

$$G_{\text{A}} = \frac{6.892 \cdot (478.9 - 1530.3) - 0.5 \cdot 10.5 \cdot 64.24}{125 - 550} = 17.86 \text{ кг/ГОД} \quad (8.12)$$

З проведених розрахунків можна дійти висновку, що витрата азоту в порівнянні зі зріджувальним режимом збільшилась на 6.44 кг/год.

9 ОХОРОНА ПРАЦІ

1. Характеристика речовин

Гелій та неон відносяться до інертних газів. Вони не мають ні кольору, ні запаху, ні смаку; безбарвні вони також у твердому та рідкому станах. Перехід із газоподібного стану в рідке відбувається у них лише за дуже низьких температур. Вибухобезпечні, не горючі.

2. Планувальне рішення щодо розміщення установки

Усі обладнання установки К.Г.У. 600/15-45, розташовується в одному цеху площею 300 м² і висотою 10 м. Приміщення цеху має прямокутну форму і розміри 10х30 м. Площа займаної установки становить 150 м² і максимальна висота (газгольдер) 6 м. Устаткування установки розраховане у приміщеннях з температурою 293±10К та вологістю не більше 80%. Розташування устаткування цеху приймається проектною організацією з урахуванням існуючих загальнотехнічних норм та правил. У повітрі приміщення не повинно бути домішок агресивних газів. Приміщення має бути забезпечене примусовою приточно-витяжною вентиляцією. Все обладнання установки має розташовуватися в одному цеху, але допускається агрегат охолодження та інше обладнання розміщувати у різних приміщеннях. Вимоги до монтажу та порядок введення в експлуатацію викладено в інструкції з експлуатації установки К.Г.У. 600/15-45.

3. Категорія вибухопожежонебезпеки виробництва

Відповідно до БНтП промислове приміщення, де розташована установка, відноситься до категорії Б – вибухопожежонебезпечні, оскільки в приміщенні прокладено трубопроводи з високим тиском.

4 Вимоги безпеки під час експлуатації систем працюючих під тиском

Герметичність - це непроникність рідинами та газами стінок і з'єднань. Порушення герметичності не тільки небажано, але й небезпечно для обслуговуючого персоналу та виробництва в цілому. Порушення герметичності може бути пов'язане із вибухом. Аналіз показує, що розгерметизація пристрою та установок відбувається в результаті дії цілого ряду факторів, які можна умовно поділити на дві групи – експлуатаційні та технологічні. Перші зумовлені фізико-хімічними властивостями робочого тіла, параметрами стану. Другі пов'язані з дефектами при виготовленні, монтажі, транспортуванні та зберіганні пристроїв. Посудина – герметично закрита ємність призначена для ведення фізичних, теплових процесів, а також для зберігання та перевезення газів та рідин під тиском. Небезпека експлуатації таких судин полягає в тому, що при втрати механічної міцності може статися руйнування судини в результаті якого енергія стиснутого середовища переходить в енергію осколків, що розлітаються. У зв'язку з небезпекою проектування та виготовлення, експлуатація таких судин регламентується та контролюється інспекцією Держмісттехнагляду.

4.1 Огляд судин

4.1.1 Судини, на які поширюється дія Правил [], повинні піддаватися технічному огляду (зовнішньому, внутрішньому огляду та гідравлічному випробуванню) після монтажу до пуску в роботу, а також періодично в процесі експлуатації.

4.1.2 Обсяг, методи та періодичність технічних оглядів судин (за винятком балонів) повинні бути визначені підприємствами-виробниками, зазначені в їх паспортах та інструкціях з монтажу та безпечної експлуатації.

Огляд балонів має проводитися за методикою, затвердженою розробником конструкції балонів, у якій мають бути зазначені періодичність огляду та норми бракування.

У разі відсутності таких вказівок технічний огляд повинен проводитись відповідно до вимог, викладених у таблицях 10, 11, 12, 13, 14, 15 []

4.1.3. Судини, у яких дія середовища може викликати погіршення хімічного складу та механічних властивостей металу, а також судини, у яких температура стінки при роботі перевищує 450°C, повинні піддаватися додатковому огляду технічним персоналом підприємства відповідно до інструкції, затвердженої головним інженером. Результати додаткових оглядів мають заносити до паспорта судини.

4.1.4. Судини, що працюють під тиском шкідливих речовин 1, 2, 3, 4 класів небезпеки за ГОСТ 12.1.007-76, повинні піддаватися випробуванню на герметичність повітрям або інертним газом під тиском, що дорівнює робочому тиску. Випробування проводять технічним персоналом підприємства відповідно до інструкції, затвердженої головним інженером.

4.1.5 Перед внутрішнім оглядом і гідравлічним випробуванням посудина повинна бути зупинена, охолоджена (відігріта), звільнена від робочого середовища, що його заповнює, відключена заглушками від усіх трубопроводів, що з'єднують посудину з джерелом тиску або з іншими судинами, очищена до металу.

Футерування, ізоляція та інші види захисту від корозії повинні бути частково або повністю видалені, якщо є ознаки, що вказують на можливість виникнення дефектів судин під захисним покриттям.

Судини, що працюють із шкідливими речовинами 1 та 2 класів небезпеки за ГОСТ 12.1.007-76, до початку виконання всередині якихось робіт, а також перед внутрішнім оглядом повинні піддаватися ретельній обробці відповідно до інструкції, затвердженої головним інженером.

4.1.6 Позачерговий огляд судин, що перебувають в експлуатації, має бути проведений у таких випадках:

- після реконструкції або ремонту посудини із застосуванням зварювання або паяння елементів, що працюють під тиском;
- якщо посудина не експлуатувалася понад 12 місяців;
- якщо посудина була демонтована і встановлена на новому місці;
- перед накладенням на стінки судини захисного покриття;
- якщо такий огляд необхідний на розсуд інспектора Держмісттехнагляду або відповідальної нагляду за технічним станом та експлуатацією судини.

4.1.7 Технічне освідування судин, цистерн, балонів та бочок може проводитись на спеціальних ремонтно-випробувальних пунктах, на підприємствах-виробниках, наповнювальних станціях, а також на підприємствах власників.

4.1.8 Технічне освідування як зареєстрованих, так і які не підлягають реєстрації судин, цистерн, балонів та бочок проводиться: у власників - відповідальних за наглядом за технічним станом та експлуатацією судин, а на наповнювальних станціях, ремонтно-випробувальних пунктах та підприємствах-виробниках - спеціально призначеним для цих цілей інженерно-технічним працівником.

Зареєстровані в органах Держмісттехнагляду судини, цистерни та балони, крім того, оглядаються інспектором Держмісттехнагляду.

4.1.9 Результати технічного огляду повинні записуватись у паспорт судини особою, яка провадила освідування, із зазначенням дозволених параметрів експлуатації посудини та строків наступних оглядів.

4.1.10 На судинах, визнаних при технічному огляді, придатними до подальшої експлуатації, наносяться відомості відповідно до ст. 6.4.4.

4.1.11 Якщо при огляді будуть виявлені дефекти, що знижують міцність судини, то експлуатація його може бути дозволена при знижених параметрах (тиск і температура).

4.1.12 У разі виявлення дефектів, причини та наслідки яких встановити важко, інспектор зобов'язаний вимагати від власника судини проведення спеціальних досліджень, а в необхідних випадках подання висновку спеціалізованої організації про причини появи дефектів, а також про можливість та умови подальшої експлуатації судини.

4.1.13 Якщо при технічному огляді виявиться, що посудина внаслідок наявних дефектів або порушення Правил [] перебуває у стані, небезпечному для подальшої експлуатації, робота такої посудини має бути заборонена.

4.1.14 Судини, що постачаються у зібраному вигляді, повинні бути підприємством-виробником законсервовані та в паспорті або в інструкції з монтажу та експлуатації зазначені умови та термін зберігання. При виконанні цих вимог перед пуском у роботу проводиться тільки зовнішній та внутрішній огляд, гідравлічне випробування судин проводити не потрібно.

4.1.15 У тих випадках, коли зовнішній, внутрішній огляд та гідравлічні випробування на підприємстві-виробнику проведені представником Держприймання, про що є відповідний запис у паспорті, проведення технічного огляду судини перед пуском у роботу не потрібно, якщо він не отримав зовнішніх пошкоджень, дотримано умов та термінів зберігання, регламентовані підприємством-виробником.

4.1.16 При зовнішньому та внутрішньому оглядах повинні бути виявлені та усунуті всі дефекти, що знижують міцність судин, при цьому особлива увага має бути приділена для виявлення наступних дефектів:

- 1) на поверхнях судини - тріщин, надривів, корозії стінок, раковин;
- 2) у зварних швах – дефектів зварювання;
- 3) у заклепувальних швах – тріщин між заклепками, обривів головок, зазорів під кромками клепанних листів та головками заклепок.

4) у судинах із захищеними від корозії поверхнями-руйнувань футерування, сколювання емалі, пошкоджень металу стінок судини у місцях порушеного захисного покриття.

4.1.17 У разі потреби особа, яка проводить огляд, може вимагати видалення захисного покриття.

4.1.18 Судини, висотою понад 2 м перед оглядом, повинні бути обладнані необхідними пристроями, що забезпечують можливість безпечного доступу до всіх частин посудини.

4.1.19 Гідравлічне випробування судин проводиться тільки при задовільних результатах зовнішнього та внутрішнього оглядів.

4.1.20 Гідравлічні випробування повинні проводитись відповідно до вимог, викладених у розділі 4.6 Правил [] .

4.1.21 День проведення технічного огляду судини встановлюється адміністрацією підприємства та попередньо погоджується з інспектором Держгіртехнагляду. Посудина має бути зупинена не пізніше строку огляду, зазначеного у його паспорті.

4.1.22 Адміністрація несе відповідальність за своєчасну та якісну підготовку судини для огляду.

4.2 Вимоги до К.В.ПіА

4.2.1. Манометри

4.2.1.1 Кожна посудина та самотійні порожнини з різними тисками повинні бути забезпечені манометрами прямої дії. Манометр може встановлюватися на штуцері судини або трубопроводі до запірної арматури.

4.2.1.2 Манометри повинні мати клас точності не нижче: 2,5-при робочому тиску судини до 2,5 МПа; 1,5-при робочому тиску судини понад 2,5 МПа.

4.2.3 Запобіжні пристрої від підвищення тиску

4.2.3.1 Кожна посудина має бути забезпечена запобіжними пристроями від підвищення тиску вище за допустиме значення.

4.2.3.2 Як запобіжні пристрої застосовуються:

- 1) пружинні запобіжні клапани;
- 2) важільно-вантажні запобіжні клапани;
- 3) імпульсні запобіжні пристрої (І.З.П.), що складаються з головного запобіжного клапана (Г.З.К.) та імпульсного керуючого клапана (І.К.К.) прямої дії;
- 4) запобіжні пристрої з мембранами, що руйнуються;
- 5) інші пристрої, застосування яких погоджено з Держгірнаглядом.

4.2.3.3 Конструкція пружинного клапана повинна передбачати пристрій для перевірки справності дії клапана у робочому стані шляхом примусового відкриття його під час роботи.

4.2.3.4 Кількість запобіжних клапанів та їх пропускна спроможність мають бути обрані за розрахунком відповідно до ГОСТ12.2.085-82.

4.2.3.5 Налаштування та регулювання запобіжних клапанів повинні проводитись відповідно до ГОСТ 12.2.085-82.

Розрахунок пружинного запобіжного клапана

Пропускна здатність клапана вибирається так щоб у посудині не могло створити тиск перевищує робоче на 15%.

Не рідше 1 разу на 12 місяців запобіжні клапани таруються на стендах з подальшим опломбуванням.

Мінімальна площа перерізу запобіжного клапана визначається за такою формулою:

$$F = \frac{M}{\mu \cdot \beta \cdot \sqrt{2\rho(P_2 - P_1)}}, \text{ м}^2 \quad (10.11)$$

де: М-масова витрата робочої речовини, кг/с;

$M = 0.017846$ кг/с;

$\mu = 0.95$

μ - коефіцієнт витрати;

$\rho = 4.734$ кг/м³;

ρ - щільність середовища при тиску та температурі перед клапаном;

P_2 -тиск спрацьовування запобіжного клапана, МПа

$$P_2 = 1.15 \times P_{\text{РАБ}} \quad (10.12)$$

$$P_2 = 1.15 \cdot 2.601 = 2.99 \text{ МПа} \quad (10.13)$$

В-коефіцієнт

$V = 0.52$

$P_1 = 0.1$ МПа

P_1 -тиск навколишнього середовища, МПа;

$P_{\text{РАБ}} = 2.601$ МПа

$P_{\text{РАБ}}$ - тиск у системі, МПа;

$$F = \frac{0.017846}{0.95 \cdot 0.52 \cdot \sqrt{2 \cdot 4.734 \cdot (2.99 - 0.1)}} = 0.0069 \text{ м}^2 \quad (10.14)$$

Визначаємо діаметр прохідного перерізу клапана, м

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} \quad (10.15)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.0069}{3.14}} = 0.09 \text{ м} \quad (10.16)$$

забезпечити повний спокій до прибуття лікаря або терміново доставити до лікувального закладу.

За відсутності свідомості, але при наявності дихання та роботі серця, потрібно рівно і зручно укласти потерпілого на м'яку підстилку, розстебнути пояс і одяг, забезпечити приплив свіжого повітря. Слід давати нюхати нашатирний спирт, оббризкувати обличчя холодною водою, розтирати та зігрівати тіло.

Якщо потерпілий погано дихає – рідко, судомно або якщо дихання поступово погіршується, в той час як у всіх цих випадках продовжується нормальна робота серця, необхідно робити штучне дихання.

За відсутності ознак життя треба робити штучне дихання та зовнішній масаж серця.

Штучне дихання має бути розпочато негайно після звільнення постраждалого від дії струму та виявлення його стану. Воно повинне проводитися методом, відомим під назвою "з рота до рота" і полягає в тому, що той, хто надає допомогу, вдуває повітря зі своїх легенів у легені постраждалого через його рот. Встановлено, що повітря, яке видихається з легенів, містить достатню для дихання кількість кисню. При цьому способі потерпілого укладають на спину, відкривають йому рота і видаляють з рота сторонні предмети і слиз. Для розкриття гортані той, хто надає допомогу, закидає голову потерпілого назад, поклавши під потилицю одну руку, а другою рукою натискає на лоб або тем'я потерпілого до такого ступеня, щоб підборіддя опинилося на одній лінії з шиєю.

Після цього надаючий допомогу робить глибокий вдих і з силою видихає повітря в рот потерпілого. При цьому він повинен охопити своїм ротом весь рот постраждалого і своїм обличчям чи пальцями затиснути йому ніс. Потім той, хто надає допомогу, відкидається назад і робить новий вдих. У цей період грудна клітка потерпілого опускається, він робить пасивний видих.

Пожежна безпека

Визначення обсягу недоторканного запасу води для гасіння пожежі за БНІП 2.04.02-89.

- 1 Категорія будівлі -1;
- 2 Категорія виробництва з пожежної безпеки -Б;
- 3 Витрата води на зовнішню пожежогасіння - $g=10 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
- 4 Кількість пожеж в будівлі - $n=1$;
- 5 Розрахунковий час гасіння пожежі – $\tau = 2$ години;
- 6 Ємність пожежної водойми :

$$V = K \cdot g \cdot n \cdot \tau \cdot 3600 \quad (10.1)$$

де: К-коефіцієнт запасу;

$$K = 1.2$$

$$V = 1.2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3600 = 86.4 \text{ м}^3 \quad (10.2)$$

Розрахунок вуглекислотної установки для гасіння пожежі у приміщенні.

1 Об'єм приміщення, м^3

$$W_{\Pi} = S \cdot H \quad (10.3)$$

де: S-площа приміщення, м^2

$$S=300 \text{ м}^2$$

H - висота приміщення, м

$$H = 10 \text{ м}$$

$$W_{\Pi} = 300 \cdot 10 = 3000 \text{ м}^3 \quad (10.4)$$

2 Коефіцієнт запасу $K=1 \div 2$;

3 Довжина трубопроводів до місця гасіння пожежі $L = 20$ м;

3 Кількість вуглекислоти для гасіння пожежі визначається за такою формулою:

$$G = g_B \cdot W_{\Pi} \cdot K \cdot 1.25 \quad (10.5)$$

де: $g_B = 0.7 \text{ кг/м}^3$

g_B - концентрація вуглекислоти, кг/м^3 ;

$$G = 0.7 \cdot 3000 \cdot 1 \cdot 1.25 = 2625 \text{ кг} \quad (10.6)$$

7.3 Розрахунок кількості спринклерних головок.

Витрата води через спринклерну систему пожежогасіння визначається за такою формулою:

$$G_B = \frac{n \cdot g_{\text{ж}} \cdot 3600}{1000} \quad \text{м}^3/\text{ГОД} \quad (10.7)$$

де: G_B - витрата води, $\text{м}^3/\text{ГОД}$;

n - число голівок, шт.;

$$n = S / S' \quad (10.8)$$

S' - площа підлоги, що припадає на одну головку, м^2 ;

$S' = 10 \text{ м}^2$;

S - площа приміщення, м^2 ;

$S = 300 \text{ м}^2$;

$$n = 300/10 = 30 \text{ прим.} \quad (10.9)$$

$g_{\text{ж}}$ - витрата води через 1 головку;

$g_{\text{ж}} = 30 \text{ л/сек}$;

$$G = \frac{30 \cdot 30 \cdot 3600}{1000} = 3240 \text{ м}^3/\text{ГОД} \quad (10.10)$$

Розрахунок системи заземлення електроустаткування

Розрахунок штучного заземлювального пристрою проводиться для електричного обладнання напругою до $U=1000$.

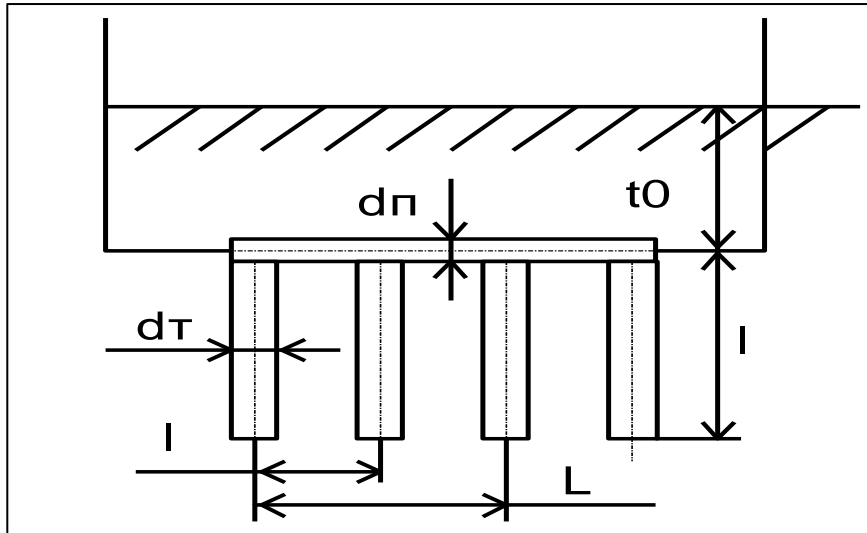


Рисунок 9.1 Схема з'єднання елементів заземлення.

1 Вертикальний заземлювач – сталева труба.

$l=2.5\div 3.0$ м

l -довжина труби, м;

$d_т$ -діаметр труби, м;

$d_т=50\div 100$ мм;

Вибираємо $l=2.7$ м та $d_т=75$ мм.

2 Горизонтальний заземлювач - сталевий пруток (труба).

Діаметр труби $d=8\div 20$ мм, приймаємо $d=10$ мм.

3 Грунт - глина.

4 Питомий опір ґрунту - $\rho_{ср} = 40$ Ом/м.

5 Кліматичний коефіцієнт враховує залежність $\rho_{ср}$ від вологості ґрунту та кліматичної зони $\psi=1.2\div 2.0$, вибираємо $\psi=1.5$.

Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат

12 Опір сполучного прутка, Ом

$$R_{\text{ГПР}} = \frac{\rho_{\text{ГПР}}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \eta} \cdot \ln \frac{L^2}{d_{\text{ГПР}} \cdot t_0} \quad (10.27)$$

де: L-довжина прутка сполучного прутка, м

$$L = (n - 1) l' \quad (10.28)$$

$$l' = (1+3) l \quad (10.29)$$

$l' = 10.8$ м;

$$L = (6-1) \times 10.8 = 54 \text{ м} \quad (10.30)$$

$\eta = 0.84$ – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача

$$R_{\text{ГПР}} = \frac{60}{2 \cdot 3.14 \cdot 54 \cdot 0.84} \cdot \ln \frac{54^2}{0.01 \cdot 0.5} = 2.69 \quad (10.31)$$

13 Загальний опір системи, Ом

$$R_c = \frac{R_{\text{ВР}} \cdot R_{\text{ГПР}}}{R_{\text{ВР}} + R_{\text{ГПР}}} \quad (10.32)$$

$$R_c = \frac{3.64 \cdot 2.69}{3.64 + 2.69} = 1.54 \text{ Ом} \quad (10.33)$$

$R_c < [R_c]$

Розрахунок виробничої вентиляції

Щоб запобігти накопиченню шкідливих речовин, у повітрі робочої зони, виробничих приміщень їх обладнають припливною, витяжною, а в окремих випадках і аварійною вентиляцією.

За відсутності виділень тепла, вологи та шкідливостей, продуктивність системи вентиляції визначається за кратністю вентиляції.

Приймаємо кратність вентиляції $n=2$.

Виходячи з кратності вентиляції, продуктивність вентиляції становитиме:

$$L = V \times n \quad (10.34)$$

де: $n = 2$ -кратність вентиляції;

$V = 3000$ м³ об'єм приміщення;

$L = 2 \times 3000 = 6000$ м³/год

Продуктивність $L = 6000$ м³/годину;

Потужність електродвигуна вентилятора визначаємо за формулою:

$$N = \frac{K \cdot L \cdot H \cdot 10^{-6}}{3.6 \cdot \eta_B \cdot \eta_{\text{ПР}}} \quad (10.35)$$

де: N -потужність, кВт;

K -коефіцієнт запасу;

$K = 1.1$;

H - опір вентиляційної мережі, Па;

$H = 500$ Па;

$\eta_B = 0.76$;

η_B – ККД вентилятора;

$\eta_{\text{ПР}} = 0.98$;

$\eta_{\text{ПР}}$ - ККД приводу;

$$N = \frac{1.1 \cdot 6000 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{3.6 \cdot 0.76 \cdot 0.98} = 1.23 \text{ кВт} \quad (10.36)$$

За розрахованою потужністю вибираємо вентилятор Ц4-70 №8, з продуктивністю $G_B = 7200$ м³/год, та опором мережі $H = 540$ Па.

Розрахунок виробничого освітлення

1 Розміри приміщення – 10х30 м;

2 Характер виконуваної роботи.

У виробничому приміщенні відбувається ремонт, обслуговування та експлуатація установки.

					<i>KPM.KT.2.631-03.1.16</i>	Лист
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат		117

3 Вибір типу джерела світла.

Вибираємо лампи розжарювання, тому що існує можливість зниження напруги менше 90% і зниження температури до плюс 5 °С.

4 Визначаємо нормовані: освітленість E_H та коефіцієнт запасу K , за таблицею 3 стр122 [12].

Приймаємо загальне висвітлення $E_H = 150$ лк, $K = 1.3$

5 Світильник марки УПД.

6 Висота підвісу світильника $H = 9$ м;

7 Розташування світильників, відстань між світильниками чи між рядами знаходимо із співвідношення

$$L/H = \lambda \quad (10.37)$$

де: $\lambda = 1.4$;

L -відстань між світильниками, м;

$$L = 1.4 \times 9 = 12.6 \text{ м} \quad (10.38)$$

8 Кількість світильників

$$n = A \times B / L^2 \quad (10.39)$$

$$n = 10 \times 30 / 12.62 = 1.9 \quad (10.40)$$

приймаємо 2 світильники.

9 Визначаємо індекс приміщення

$$i = A \times B / (H \times (A + B)) \quad (10.41)$$

$$i = 10 \times 30 / (9 \times (10 + 30)) = 0.83 \quad (10.42)$$

За таблицею 4 сторінка 128 [12] знаходимо коефіцієнт відображення від стелі та стін: $\rho_{\text{п}} = 30\%$, $\rho_{\text{ст}} = 10\%$

10 Визначаємо коефіцієнт світлового потоку $\eta = 35$;

11 Обчислимо світловий потік лампи, лм

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{100 \cdot E_H \cdot K \cdot z \cdot S}{n \cdot \eta} \quad (10.43)$$

де: E_H – нормована мінімальна освітленість, лк;

S-площа приміщення, м²;

$$S = 300 \text{ м}^2;$$

$$Z = 1.15$$

Z – коефіцієнт мінімальної освітленості;

$$K = 1.3;$$

K – коефіцієнт запасу;

n = 2 – кількість світильників;

$$\Phi_L = \frac{100 \cdot 150 \cdot 1.3 \cdot 1.15 \cdot 300}{2 \cdot 35} = 96107 \text{ лм} \quad (10.44)$$

По таблиці 5 сторінка 129 [12] вибираємо лампу Г215-225-1000.

У якої світловий потік $\Phi_L^3 = 19600$ лм, що призводить до збільшення числа світильників у 5 разів. Тому отримуємо n = 10 прим.

$$\Phi_L = \frac{100 \cdot 150 \cdot 1.3 \cdot 1.15 \cdot 300}{10 \cdot 35} = 19221 \text{ лм} \quad (10.45)$$

Відхилення складе:

$$\Delta\Phi_L = \frac{\Phi_L^3 - \Phi_L}{\Phi_L^3} \quad (10.46)$$

$$\Delta\Phi_L = \frac{19600 - 19221}{19600} = 0.019 \quad (10.47)$$

відхилення становило 1.9%, що допустимим, отже система висвітлення розрахована правильно.

Визначимо сумарну потужність системи освітлення цеху за формулою:

$$N = p \times n \quad (10.48)$$

де: p - Потужність однієї лампи, Вт;

$$p = 1000 \text{ Вт};$$

Підставивши всі необхідні значення у вираз (10.48) отримуємо:

$$N = 10 \text{ кВт}.$$

10. ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи, згідно з обраною темою: "Дослідження системи криогенного забезпечення з холодопродуктивністю 600Вт на температурному рівні 16 К", проведено порівняльний аналіз різних схем зрідження гелію. Обумовлений темою проекту температурний рівень здатні забезпечити лише гелієві системи. З можливих рішень найбільш ефективною виявилася схема зріджувача середнього тиску (2,6МПа) з попереднім азотним охолодженням, поршнеvim детандером з використанням ефекту дроселювання. Така установка не потребує зовнішнього контуру водневого охолодження і, отже, характеризується вибухобезпекою. Рідкий азот, що використовується як холодоагент, відносно доступний і має прийнятну вартість.

У ході аналітичного дослідження циклів було проведено такі розрахунки:

1) Розрахунок гелієвого зріджувача під час роботи в зріджувальному режимі. Оптимізація даного циклу дозволила визначити параметри, при яких досягається максимальна продуктивність рідкого продукту. Вивчено вплив експлуатаційних факторів (частка детандерного потоку, адіабаного ККД детандера, недорекуперації основного теплообмінника) на коефіцієнт зрідження. Отримано залежність витрати рідкого азоту від частки детандерного потоку та коефіцієнта зрідження. В ході показано, що при витраті через компресор 360 $\text{нм}^3/\text{год}$ кількість гелію, що зріджується, досягає 29,8 дм^3 рідкого гелію, що еквівалентно 20,9 $\text{нм}^3/\text{год}$. Таким чином максимальний коефіцієнт зрідження (по відношенню до потоку, що подається в установку) склав 5,8%.

2) Проведено розрахунок циклу гелієвої установки під час роботи в рефрижераторному режимі. Було отримано Q_0 -Т характеристика системи, тобто залежність холодопродуктивності від температурного рівня. Згідно з розрахунками цей цикл дозволяє отримати на температурному рівні 16 К, залежно від величини теплоприпливів, $Q_0 = 570\text{-}600$ Вт.

					<i>KPM.KT.2.631-03.1.16</i>	Лист
Ли	Зм.	№ докум.	Підп.	Дат		120

ЛІТЕРАТУРА

1. Будневич С.С. Приклади розрахунків установок глибокого охолодження; "Машинобудування", Ленінград, 1972.
2. Головка Г.А. Установки для виробництва інертних газів; Ленінград, "Машинобудування", 1974.
3. А. Франів, В. Стадник, В. Курляк _Фізика низьких температур_, Львів -2016.
4. Фізика низьких температур : навчальний посібник / А. Франів, В. Стадник, В. Курляк. – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2018. – 362 с.
5. Архаров А.М, Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М. Покоління нової техніки для кріогенного виробництва неону та гелію високої чистоти. "Холодильна техніка та технологія", випуск 62, 1999, ОДАХ
6. Мікулін Є.І. Кріогенна техніка.; "Машинобудування", Москва, 1969.
7. Різак В.М., Різак І.М. Фізика низьких температур. – Ужгород: Видавництво УжНУ. – 2003. – 164 с.
8. Усюкін І.Г. Установки, машини та апарати кріогенної техніки.; Москва, Харчова промисловість, 1976.
9. Малков М.П. Довідник з фізико-технічних основ криогеніки.; Москва, "Енергія", 1973.
10. Юдін Є.М. Охорона праці машинобудуванні.; "Машинобудування", Москва, 1983.
11. Омельченко О.В., Цвіркун Л.О. Тепломасообмін : навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. 100 с.
12. Різак В М., Різак І. М., Рудаєвський Е. Я., Кріогенна фізика і техніка. – К: вид. «Наукова думка». – 2006. – 512 с.
13. Комплекс нової техніки для кріогенного виробництва неону та гелію високої чистоти. Архаров А.М., Бондаренко В.Л., Савін М.Ю. та ін// Тез.докл.між.н-техн.конф. Холодильна техніка Росії. Стан та перспективи напередодні ХХІ століття.» – С.-Петербур. – 1998. – С.40-41.

14. С.С.Бердоносков. Інертні гази вчора та сьогодні. - Вид. «Освіта», Москва. – 1966.
15. Головка Г.А. Кріогенне виробництво інертних газів. - 2-ге вид., перероб і доп. – Л.: Машинобудування, Ленінгр. від. -1983.
16. Кріогенна техніка: основи теорії і розрахунку циклів кріогенних установок : навч. посіб. / В. М. Арсен'єв, В. М. Козін. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 272 с
17. Данилов І.Б. Ефективність циклів, що застосовуються для зрідження гелію.- "Хімічне машинобудування", 1964 №2.
18. Буткевич І.К., Романишин В.Ф. Дослідження кріогенної гелієвої установки типу КГУ-150/4.5.-Дослідження процесів у кріогенних установках та системах. 1980.
19. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: підруч. Для студ.вищих навч.закладів. За ред. Гандзюка М.П. – К.: Каравела, 2003. – 408 с.
20. Капіца П.Л., Данилов І.Б. Детандерна установка для зрідження гелію. Журнал технічної фізики. Том XXXI, №4, 1961.
21. Бондаренко В.Л., Вігуржинська С.Ю., Оптимізація системи попереднього очищення неону-гелієвої суміші.; "Холодильна техніка та технологія", випуск 63, 1999 рік, ОДАХ