

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

М. М. МАСЛІКОВ

КРІОГЕННА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ

**Курс лекцій
для студентів спеціальності 6.090500
“Холодильні машини і установки”
денної, заочної та скороченої форм навчання**

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри теплоенергетики
та холодильної техніки як курс лекцій
Протокол №1 від 30.08.07

Масліков М.М. Кріогенна техніка і технологія: Курс лекцій для студ спец.
6.090500 “Холодильні машини і установки” ден., заоч. та скороч. форм навч. –
К.: НУХТ, 2007.– 108 с.

Рецензент Форсюк А.В., канд.техн.наук

Масліков М. М., канд. техн. наук

© М.М.Масліков, 2007
© НУХТ, 2007

ЗМІСТ

1. Загальна інформація про кріогеніку	4
2. Основні способи отримання низьких та наднизьких температур	9
3. Термодинамічні засади кріогенної техніки	15
4. Властивості технічних матеріалів при низьких температурах	20
5. Кріогенні рідини та їх властивості	28
6. Системи зрідження газів	32
7. Компоненти систем зрідження	48
8. Системи розділення та очищення кріогенних рідин	54
9. Зберігання і транспортування кріорідин	67
10. Кріорефрижератори	74
11. Кріогенні технології	81
Список літератури до курсу	94
Додатки	95

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО КРІОГЕНІКУ

1.1. Вступ

Кріогенна техніка та технологія, або як її інакше називають кріогеніка (з грецької $\kappa\rho\upsilon\omicron\varsigma$ – холод, $-\text{genes}$ – породження) – наука про одержання (кріогенна техніка) та використання (кріогенна технологія) низьких температур. Об'єктом її дослідження є кріогенні системи. Кріогенною системою називають групу компонентів, що взаємодіють між собою та перебувають при кріогенних температурах. Прикладами таких систем можуть бути установка зрідження повітря, гелієвий рефрижератор, посудина для зберігання кріогенних рідин з контрольно-вимірювальними пристроями, надпровідна магнітна котушка тощо.

XIII конгрес з холоду у 1971 році ухвалив рішення: вважати областю кріогенних температур зону нижче за 120 К (-153°C). Причиною цього є те, що температури кипіння звичайних холодоагентів (аміак, фреони) лежать вище за цю точку, а нормальні температури зрідження найпоширеніших газів (азот, кисень, водень, гелій та ін.) – нижче за неї.

Кріогеніка займається розробленням та вдосконаленням низькотемпературних технологій, процесів та обладнання. Тісно пов'язаними з нею є ряд інших наук: кріофізика (займається фундаментальними дослідженнями у кріогенній області), кріобіологія (досліджує властивості біологічних об'єктів при кріогенних температурах), кріомедицина (розробляє методи лікування з використанням кріотехнологій), кріоелектроніка (розробляє електричні та електронні пристрої, мікропроцесорну техніку для роботи у кріогенній області, у тому числі з використанням надпровідних технологій) та інші. Використовують кріогенні технології і у харчовій промисловості – розроблені системи безмашинного охолодження з використанням кріорідин, кріогенні методи надшвидкого заморожування, сублімаційного висушування, кріоподрібнення, кріогрануляції та ін.

1.2. Історія розвитку кріогеніки.

1823 – Майкл Фарадей (Англія) довів можливість зрідження деяких газів (SO_2 , аміак та ін.). У 1840 р він одержав рідкий хлор (163 К) у трубці, охолодженій в суміші змішування твердого CO_2 та спирту під ковпаком вакуум-насоса. За таких температур основні складові повітря (азот, кисень), а також водень і метан не зріджувалися, за що згодом отримали назву постійних газів.

1840-ві – Фізик Джон Горрі (Флоріда, США) розробив розширювальну машину для охолодження повітря та вироблення льоду. Вона використовувалась для кондиціонування повітря у лікарнях. Принцип охолодження повітря (аж до зрідження) шляхом його розширення зі здійсненням зовнішньої роботи (у детандерах) використовується і досі.

1857 – В. Сіменс (Німеччина) побудував перший поршневий детандер.

1877 – Гірничий інженер Луї Поль Кайсте (Франція) одержав туман з крапель рідкого кисню шляхом попереднього охолодження посудини зі

стисненим до 30 МПа киснем та подальшим раптовим розширенням кисню (90 К). Доведено можливість зрідження постійних газів.

1877 – Р. Пікте (Швейцарія) одержав рідкий кисень, використовуючи каскадну холодильну машину (90 К).

1883 – С. Вроблевський та Е. Ольшевський створили лабораторію з фізики низьких температур у Краківському університеті (Польща), у якій одержали рідкий кисень у вигляді “спокійно киплячої у дослідній трубці рідини” у кількості достатній для вивчення його властивостей. Спосіб – одноразове адіабатне розширення стисненого газу, охолодженого киплячим під вакуумом етиленом. Через кілька днів на тій самій установці одержаний рідкий азот (77 К).

1884 – С. Вроблевський за методикою Кайєте одержав туман з крапель рідкого водню шляхом охолодження водню у капілярній трубці до температури рідкого кисню та подальшого розширення від 10 МПа до 0,1 МПа. Для забезпечення теплоізоляції С. Вроблевський та Е. Ольшевський розробили принцип парового екранування дослідної труби у концентричних трубах (пара кріорідини, проходячи у зазорах між концентричними трубами, зменшує теплонадходження до дослідної труби).

1892 – Д. Дьюар, професор хімії Королівського університету (Лондон) винайшов посудину з вакуумованими стінками для зберігання кріорідин (посудина Дьюара). Це дало змогу зробити великий крок вперед у зберіганні кріорідин.

1895-1896 – К. Лінде (Німеччина) та В. Хемпсон (Англія) побудували лабораторні зріджувачі повітря безперервної дії. К. Лінде одержав патент на зрідження повітря. Заснована ним Linde Company – одна з провідних у кріогенній техніці. Вперше оцінено промислове значення зрідження повітря.

1895 – Хайк Камерлінг Онесс заснував фізичну лабораторію у Лейденському університеті (Голандія). У ній у 1908 р одержано рідкий гелій (близько 60 см³) (4 К), до 1919 р. продуктивність зріджувачів гелію сягнула 2 л/год.

1898 – Д. Дьюар одержав 20 см³ рідкого водню, що вільно кипів у вакуумно ізолюваній трубці (20,5 К). Через кілька місяців він же одержав твердий водень (14 К).

1902–1906 – Ж. Клод (Франція) здійснив зрідження повітря в установці з детандером та вдосконалив процес розділення повітря в ректифікаційній колоні з дефлегматором.

1902– здійснене розділення повітря у колоні дворазової ректифікації (К.Лінде).

1903 – К. Цюлковський (Росія) обґрунтував доцільність застосування зріджених кисню та водню у ракетній техніці.

1907 – здійснене розділення повітря у колоні дворазової ректифікації (К.Лінде).

1908 – у Парижі відкрився 1 Міжнародний конгрес з холодильної справи. Широке комерційне визнання холоду (в основному для перевезення м'яса з Америки до Європи)

1910 – у Лейденському університеті під час невдалої спроби отримання твердого гелію протягом тривалого часу підтримувалась температура 1,04 К. Це стало рекордно низькою температурою для того часу, але твердий гелій не був отриманий, адже крім низької температури для цього потрібен був ще й тиск понад 25 атм.

1912 – побудовано промислові установки розділення повітря (Німеччина, Франція)

1915 – К. Лінде одержав аргон шляхом ректифікації аргонної фракції

1921 – створено гелієві заводи (1000 м³/добу) (США)

1926 – Ф. Сімон застосував метод адіабатної десорбції для зрідження гелію

1929-1930 – В.П.Глушко, Ф.А.Цандер, С.П.Корольов створили рідинні ракетні двигуни, окисником у яких був рідкий кисень.

1932 – запропонований метод зрідження гелію одноступеневим адіабатним розширенням (Ф.Сімон)

1932 – В. Кізом шляхом вакуумування рідкого гелію досягнув температури 0,71 К.

1934 – П.Л.Капіца (СРСР - Англія) побудував перший зріджувач гелію з детандером (11 К). Початок промислового зрідження гелію.

1939 – П.Л.Капіца (СРСР) – розробив вискоєфективний активно-реактивний турбодетандер та здійснив розділення повітря на основі циклу низького тиску;

1948 – у Лос-Аламоській лабораторії (США) отримано рідкий гелій-3 (0,25 К).

1940–50-ті – активний розвиток ракетної техніки потребував вироблення зрідженого кисню у промислових масштабах. Активний розвиток киснедобувної промисловості.

1954 – Д.Доунт, К.Барнес, К.Хір за допомогою розробленого магнітного кріорефрижератора отримали стійкі температури 0,2...0,3 К. Шляхом адіабатного розмагнічування парамагнетиків досягнуті короточасні температури 0,0114К

1955–1958 – у СРСР винайдено промисловий спосіб виділення дейтерію з водню (М.П.Малков)

1959 – розроблено цикл Гіффорда-Мак-Магона. Відкрилася можливість використання малих газових холодильних машин.

1965 – 1970 – початок практичного використання надпровідності у електричних машинах. До 1985 року їх потужність зросла до 500 МВт

1965 – 1970 – збудовані тепловикористовувальні холодильні машини, що працювали за циклом Вюлемье-Таконіса.

1978 – розроблені надпровідні квантові інтерферометри 10...14А, 10...16В

1983 – А.Лаказ (Франція) сконструював магнітні рефрижератори безперервної дії (холодопродуктивність 1,35...2,4 Вт, температурний рівень 1,8...2,1 К).

1980–1985 – у СРСР розроблені надпровідні установки для прискорювачів заряджених часток та плазмових систем.

1986 – К. Мюллер (Швейцарія) та Дж. Беднорц (Німеччина) встановили, що керамічний провідник, збудований з атомів лантану, барію, міді та кисню має температуру переходу у надпровідний стан 35 К – відкриття високотемпературної надпровідності.

1987 – 2000 – дослідження високотемпературної надпровідності (СРСР, США, Японія, Німеччина). Критична температура сягнула 164 К, тобто вийшла за межі кріогенної області.

1989 – у двоступеневому кріостаті ядерного розмагнічування у Лабораторії низьких температур Хельсінкського університету групою під керівництвом О. Лоунасаа у 1989 р. досягнута найнижча на сьогодні температура $2 \cdot 10^{-9}$ К.

2007 – фірма BMW розпочала серійне виробництво автомобілів, паливом для яких є зріджений водень.

1.3.Сучасні галузі промисловості та науки, де застосовується кріогенна техніка.

Кріогенна техніка на початку свого розвитку мала на меті *отримання зріджених газів*. Нині з повітря отримують великі обсяги різних газів (кисень, азот, аргон та ін.). Ці гази (насамперед кисень) використовують у багатьох галузях промисловості: металургії, будівництві, медицині, авіації, ракетній техніці та ін. Зріджений азот, отриманий з повітря, є найуживанішим охолодним середовищем та холодоносієм у кріогенних технологіях. Для зберігання газів у великих кількостях використовують зрідження (це значно зменшує потрібний об'єм сховища) та зберігання у кріосховищах.

У *фізичних дослідженнях* кріорідини використовують для охолодження різноманітних об'єктів, зокрема під час проведення досліджень у галузі елементарних часток та астрофізиці, для охолодження обмоток потужних лазерів, прискорювачів, та ін. Надпровідні магніти використовують для створення потужних магнітних полів з малими затратами енергії.

У *електротехніці* використання надпровідних технологій для вироблення, транспортування та використання електроенергії дає змогу значно підвищити потужність електричних машин, зменшити їх розміри, скоротити втрати енергії.

Досягнення надглибокого вакууму за допомогою кріогенного охолодження використовують під час вирощування чистих кристалів напівпровідників, проведення різноманітних фізичних досліджень, конструювання систем зв'язку.

За допомогою *кріорефрижераторів* малого розміру охолоджують мікропроцесори, елементи радіоелектронних мікросхем. Крупніші

кріорефрижератори використовують для охолодження потужних передавачів (наприклад, у системах мобільного зв'язку)

У *медицині, біології та сільському господарстві* кріорідини використовують для консервування та зберігання клітин, органів, організмів. Зокрема так зберігають ембріони елітних порід худоби. Надшвидке кріогенне заморожування дає змогу зберегти структуру клітини та її хімічний склад, що важливо також для біохімічних та біологічних досліджень. Розроблено способи лікування з використанням кріотехнологій (кріохірургія, кріотерапія, кріоанестезія та ін.).

У *харчовій промисловості* зріджений азот використовують для швидкого заморожування продуктів, кріоподрібнення, сублімаційного висушування.

У *авіації та ракетно-космічній техніці*, крім використання зрідженого кисню як окисника у двигунах, використовують зріджений водень у якості палива. Для інтенсивного охолодження корпусів використовують зріджений азот. Розпочато використання кріогенних двигунів і на наземному транспорті.

Кріоподрібнення використовують для екологічно безпечної *утилізації промислових та побутових відходів* (зокрема автомобільних шин).

Детальніше кріотехнології будуть розглянуті у лекції 11.

2. ОСНОВНІ СПОСОБИ ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТА НАДНИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

2.1. Дроселювання (ефект Джоуля-Томсона)

У всіх системах зрідження газів, зокрема у найпростішій системі зрідження повітря Хемпсона (рис. 1) використовується дросельний вентиль та відбувається дроселювання за законом Джоуля-Томсона.

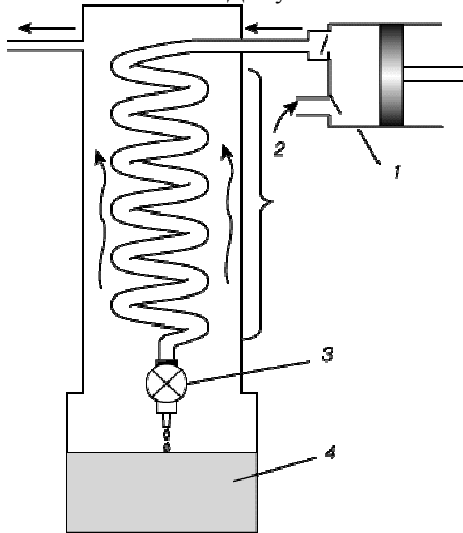


Рис. 1. Зріджувач повітря Хемпсона (1 – повітряний компресор; 2 – теплообмінник; 3 – дросельний вентиль; 4 – зріджене повітря)

Для сталого потоку в дросельному вентилі за відсутності теплообміну та дуже малих змін потенціальної та кінетичної енергії потоку можна вважати, що початкова та кінцева точки лежать на одній ізоентальпі. Для реальних газів ізоентальпи проходять, як показано на рис.2. Отже дроселювання може призвести як до зниження температури (зліва від кривої інверсії KI), так і до її зростання (справа від KI). Зрозуміло, що у криогенних системах дроселювання мусить вести до зниження температури.

Охолодження газу під час дроселювання характеризується коефіцієнтом Джоуля-Томсона:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \quad (1)$$

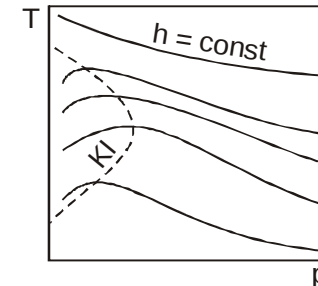


Рис.2. Вигляд ізоентальп ($h = \text{const}$) для реального газу

Для ідеального газу $\mu_{JT} = 0$, зміни температури під час дроселювання не відбувається. Ентальпія $h = u + pv$. Отже

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_p} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + \left(\frac{\partial(pv)}{\partial p} \right)_T \right] > 0 \quad (2)$$

Для реальних газів перший доданок у дужках завжди від'ємний. Це пояснюється тим, що під час розширення (зменшення тиску) молекули віддаляються одна від одної, їх потенціальна енергія зростає. Підведення ззовні теплоти та роботи відсутнє, отже кінетична (внутрішня) енергія молекул (її мірою є температура) буде падати. Другий доданок може залежно від температури та тиску газу бути додатним, від'ємним або нульовим (для ідеального газу).

З рівняння Ван-дер-Ваальса (рівняння стану для реальних газів):

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \quad (3)$$

де коефіцієнт a враховує сили міжмолекулярної взаємодії, коефіцієнт b – розмір молекул. Для газу Ван-дер-Ваальса:

$$\mu_{JT} = \frac{(2a/RT)(1 - b/v)^2 - b}{c_p \{ 1 - (2a/vRT)(1 - b/v)^2 \}} \quad (4)$$

Для великих об'ємів газу ($v \rightarrow \infty$) формула (4) набуває вигляду:

$$\mu_{JT} = \frac{1}{c_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right). \quad (5)$$

Крива інверсії складається з точок, для яких $\mu_{JT} = 0$ тобто $(2a/RT)(1 - b/v)^2 = b$ звідки температура інверсії для газу Ван-дер-Ваальса:

$$T_i = \frac{2a}{bR} \left(1 - \frac{b}{v} \right)^2. \quad (6)$$

Максимальна температура інверсії (коли $b/v = 0$ тобто $p=0$):

$$T_{i \max} = \frac{2a}{bR} \quad (7)$$

Максимальна температура інверсії для різних газів

Газ	$T_{i,max}, K$
Гелій – 4	45
Водень	205
Неон	250
Повітря	603
Азот	621
Кисень	939
Аміак	1994

Для досягнення ефекту охолодження у дроселі потрібно, щоб температура перед дроселюванням була нижчою за $T_{i,max}$. Якщо при цьому кінцева температура газу досягне температури зрідження, відбудеться часткове зрідження газу.

Для отримання нижчих температур використовують каскадні холодильні машини, що розглядатимуться далі.

2.2. Адіабатне розширення (детандери)

Для одержання низьких температур використовують розширення газу у пристрої, що виконує роботу – детандері (рис. 3)

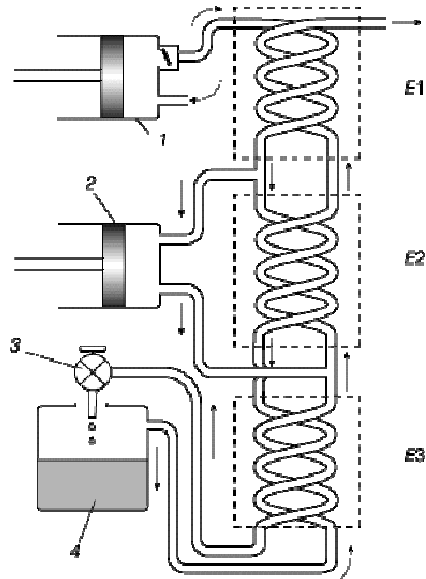


Рис. 3. Детандерна система зрідження повітря Клода (1 – повітряний компресор; 2 – детандер; 3 – дросельний вентиль; 4 – зріджене повітря)

У ідеальному випадку процес буде зворотним та адіабатним – отже ентропія газу лишатиметься сталою. Коефіцієнт ізоентропійного розширення:

$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = - \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_p \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p. \quad (8)$$

Виходячи з того, що для всіх газів об'єм зростає зі зростанням температури, $\mu_s > 0$. Таким чином, ізоентропійне розширення в детандері (на відміну від дроселювання) завжди веде до зниження температури. Енергія відводиться від газу у вигляді зовнішньої роботи, що може бути корисно використана. Для заданого діапазону тисків ізоентропійне розширення завжди дасть нижчу температуру ніж ізоентальпійне. Але під час роботи детандера у області вологої пари виникає багато технічних проблем через нестискуваність рідини, ускладнення змашування та ін. Тому навіть у детандерних системах зрідження газів обов'язково використовується дроселювання.

2.3. Адіабатне відкачування пари.

Якщо посудину з кріорідиною теплоізолювати (умови можна вважати адіабатними) та відкачувати утворювану пару, то зі зниженням абсолютного тиску буде знижуватися і температура кипіння. При цьому теплота, необхідна для випаровування, відбирається від рідини, що залишилася. Зануливши об'єкт у таку рідину можна знижувати його температуру допоки рідина не випарується повністю або не затвердне. Використовуючи зріджений гелій-4, що не твердне за низького тиску, та вакуум близько 30 мПа, отримано температури близько 0,4 К. Недоліками цього способу є потреба у високому вакуумі та висока вартість зрідженого гелію

2.4. Рефрижератори розчинення.

Рефрижератори розчинення використовують для підтримання температур 0,005...0,05K. За принципом дії цей рефрижератор нагадує абсорбційну холодильну машину. Його робочим тілом є суміш гелію-3 та гелію-4. Детальніше рефрижератори розчинення будуть розглянуті у лекції 10.

2.5. Адіабатне розмагнічування парамагнетиків.

У. Джіок та П. Дебай запропонували спосіб магнітного охолодження: використовувати замість газу парамагнітні солі (церієво-магнієвий нітрат, залізоамонієві та хромокалієві галуни, мідно-калієвий та залізоамонієвий сульфати, сульфат гадолінію та ін.), а замість тиску (для впорядкування молекул) – магнітне поле. За його відсутності молекули або магнітні іони (диполі) орієнтовані довільно. Після ізотермічного накладення поля при температурі близько 1 К (аналог ізотермічного стиснення газу) вони впорядковуються, орієнтуються за силовими лініями, зменшуючи ентропію матеріалу. Теплота, що виділяється при цьому відводиться (наприклад зрідженим гелієм). Якщо після цього теплоізолювати парамагнетик і зняти

магнітне поле у адіабатному процесі (аналог адіабатного розширення газу), то впорядкованість диполів зменшиться. Для збереження сталої ентропії цей процес мусить супроводжуватись падінням температури. У такий спосіб досягають температур порядку $10^{-2} \dots 10^{-3}$ К.

Для отримання особливо низьких температур ($10^{-4} \dots 10^{-9}$ К) використовують адіабатичне розмагнічування ядер (металічної міді та ін).

2.6. Інші способи

Для отримання низьких температур використовують також інші способи.

Вихорові труби. У 1931 р. французький інженер Ж. Ранк відкрив ефект температурного розділення газового потоку у вихоровій течії. Якщо потік стисненого газу подати на равликовий завихрювач, то утвориться інтенсивна колова течія, причому виникне нерівномірне температурне поле. Шари газу поблизу осі вихору будуть охолоджуватися, а периферійні шари – нагріватися. Далі охолоджений і нагрітий потоки розділяють. Термодинамічна ефективність вихорової труби низька – зниження температури у ній становить близько 55% від зниження температури у ізоентропійному процесі, до того ж, частка охолодженого потоку становить лише 25-35% від загальної маси газу.

Термоелектричне охолодження ґрунтується на ефекті Пельтьє (відкритий у 1834 році). Цей ефект полягає у виділенні або поглинанні теплової енергії у місцях контакту двох різновидних провідників під час протікання крізь них електричного струму. Робочим тілом такої охолоджувальної системи є електронний газ, що переносить теплоту від холодного контакту до теплого. У напівпровідниках цей ефект значно сильніший ніж у металах. У восьмикаскадній батареї з напівпровідникових термоелектричних охолоджувачів досягнута температура 134 К. Перевагами термоелектричного охолодження є простота, надійність, відсутність рухомих частин. Але ККД таких систем становить 1–2%.

Десорбційне охолодження проходить з використанням твердого адсорбенту. Під час адсорбції молекули сорбованої речовини передають частину своєї енергії адсорбенту і він нагрівається. Якщо охолодити такий адсорбент і теплоізолювати його, то відрив молекул від поверхні під час десорбції призведе до охолодження адсорбенту. З використанням зрідженого водню можна досягти температур 4...10 К.

За подібним принципом працює десорбційна система охолодження Саймона. Охолоджуваний об'єкт поміщують до камери 1. Камера 3, у якій міститься адсорбент, заповнюється газоподібним гелієм під тиском. Йде сорбція, теплота, що виділяється при цьому, відводиться через заповнений газоподібним гелієм кожух 4 до зрідженого азоту 5. Коли адсорбент охолодиться до температури близько 78 К його теплоізолюють, створюючи вакуум у кожусі 4. Потім у камеру 3 подають зріджений водень, яким адсорбент додатково охолоджується до температури близько 20 К. Сам водень при цьому повністю випаровується і відводиться з камери 3. Після цього тиск гелію

знижують, внаслідок чого йде десорбція, і адсорбент (а отже і камера 1) охолоджується.

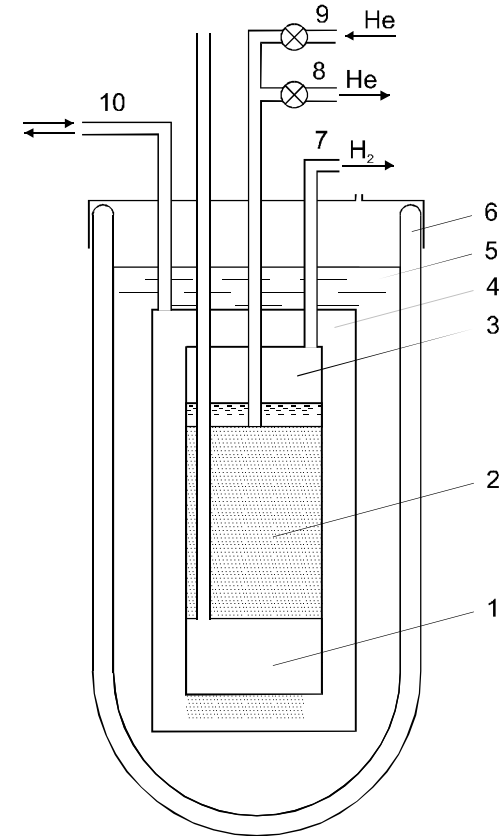


Рис. 4. Схема десорбційного охолоджувача Саймона (1 – охолоджувана камера; 2 – адсорбент; 3 – посудина з адсорбентом та зрідженим воднем; 4 – вакуумний кожух; 5 – зріджений азот; 6 – посудина Дьюара; 7, 8, 9, 10 – трубопроводи)

Компресійне охолодження гелію-3 ґрунтується на його особливих властивостях. При температурі нижче 0,3 К під час адіабатного стиснення гелій-3 охолоджується доки рідка фаза не затвердне. Це пояснюється значним внеском ядерного магнетизму гелію-3 у його ентальпію. Метод компресійного охолодження був теоретично передбачений І.Я.Померанчуком у 1950 р. та експериментально підтверджений Ю.Д.Ануфрієвим у 1965 р. Його застосовують у лабораторіях вкупі з рефрижератором розчинення для отримання температур нижче 0,003 К.

3. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЗАСАДИ КРІОГЕННОЇ ТЕХНІКИ

3.1. Мінімальна робота у кріогенних системах

Для аналізу ефективності кріогенних систем використовують термодинамічні співвідношення.

Загальна витрата енергії у кріогенній установці:

$$L = L_{\min} + \Delta L, \quad (9)$$

де $L_{\min}$ – мінімальна витрата теплової енергії, необхідна для здійснення ідеальних (оборотних) процесів, тобто роботи термодинамічно ідеальної системи; ΔL – витрати енергії на компенсацію втрат у реальних процесах (вони набагато більше за $L_{\min}$).

Основними задачами кріогенної техніки є: термостатування, охолодження речовини чи об'єкта, зрідження та кристалізація чистої речовини чи певних складових сумішей, зрідження газів та розділення газових сумішей.

Термостатування – процес підтримування сталої температури ($<120\text{K}$) у певному об'єкті, речовині чи середовищі. Теплота повинна переноситися з нижнього температурного рівня T_x на верхній T_0 (довкілля). Q_x – корисна холодопродуктивність, Вт:

$$Q_x = Gq_x, \quad (10)$$

де G – витрата робочої речовини, кг/с, q_x – питома холодопродуктивність.

Термодинамічно ідеальна система термостатування складається з двох компресорів та двох детандерів (рис. 5а). Для області вологої пари ізотерми співпадають з ізобарами, тому замість ізотермічних компресорів використовують ізобарні теплообмінники (рис. 5б).

З термодинаміки відомо, що мінімальна робота циклу:

$$l_{\min} = q_k - q_x, \quad (11)$$

де q_k – питома теплота, що відводиться у довкілля під час ізотермічного стискування. З рис. 5:

$$l_{\min} = l_k + l'_k - l_d - l'_d; \quad (12)$$

для ізотермічних процесів:

$$q_k = T_0(s_1 - s_2), \quad q_x = T_x(s_4 - s_3), \quad (13)$$

з урахуванням того, що $(s_4 - s_3) = (s_1 - s_2)$:

$$l_{\min} = (T_0 - T_x)(s_1 - s_2). \quad (14)$$

Охолодження – процес зниження температури об'єкта (найчастіше газу) від T_{x1} до T_{x2} наприклад у ізобарному процесі у теплообміннику TOA (рис. 6).

Якщо вважати теплообмінник ідеальним, то $q_x = h_{x1} - h_{x2}$ з рівняння теплового балансу системи:

$$l_k + l'_k - l_d = l_{\min} = q_k - q_x \quad (15)$$

тоді мінімальна робота охолодження:

$$l_{\min} = T_0(s_1 - s_2) - (h_4 - h_3) \quad (16)$$

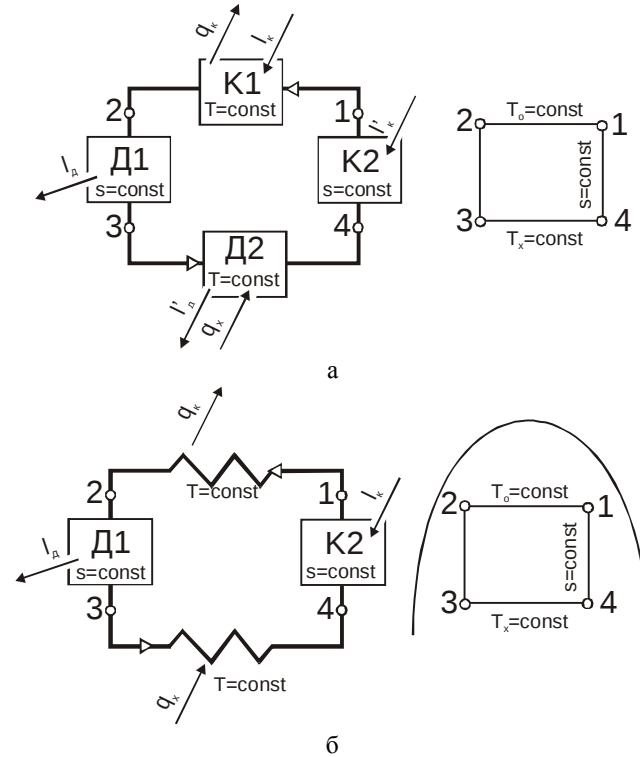


Рис. 5. Схеми та цикли ідеальних системи термостатування: а – для газу; б – для області вологої пари (K1 – ізотермічний компресор; K2 – ізоентропійний компресор; D1 – ізоентропійний детандер; D2 – ізотермічний детандер).

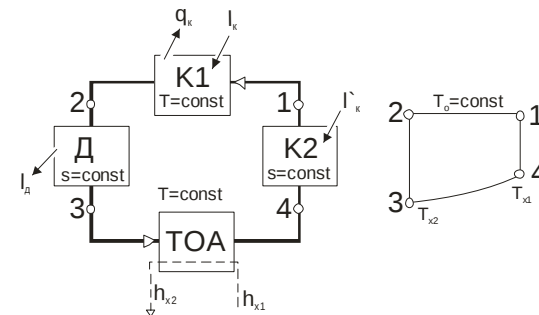


Рис. 6. Схема та цикл ідеальної системи охолодження (K1 – ізотермічний компресор; K2 – ізоентропійний компресор; D – ізоентропійний детандер; TOA – теплообмінник).

Конденсація та кристалізація чистої речовини з термодинамічної точки зору подібні до термостатування, бо температура процесу є сталою, а теплоту, що виділяється, слід відводити. Якщо конденсація відбувається з суміші, то процес складніший, бо слід враховувати зміну температури процесу через зміну парціальних тисків компонентів суміші.

Зрідження газу – один з основних процесів у кріогенній техніці. Ідеальна система зрідження наведена на рис. 7. За конструкцією вона подібна до систем термостатування і охолодження, але процеси стискання, охолодження та розширення проходять у області газу, а процес підведення теплоти (кипіння) – у області газорідинної суміші. Зріджуваний газ (пунктир на рис. 7а) охолоджується та зріджується у теплообміннику ТОА. Якщо уявити, що зріджуваний газ є робочим тілом і повністю конденсується у детандері, тобто система працює за розімкненим циклом, то теплообмінник стає непотрібним і система спрощується (рис. 7б).

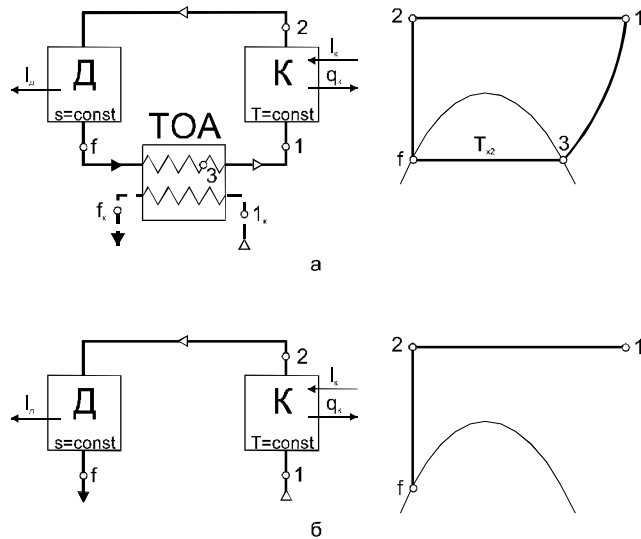


Рис. 7. Схема та цикл ідеальної системи зрідження (К – ізотермічний компресор; Д – ізоентропійний детандер; ТОА - теплообмінник).

Мінімальна робота зрідження газу виконана у процесі 1 – 2 – f становить:

$$l_{\min} = l_k - l_d = T_0(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) - (h_2 - h_f) = T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f). \quad (17)$$

З іншого боку, якщо розглянути ізобарний процес f – 3 – 1:

$$l_{\min} = q_k - q_x = T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f). \quad (18)$$

Формули одержані у виразах (17) і (18) однакові. Отже мінімальна робота зрідження не залежить від тиску стисненого газу, а залежить лише від виду газу

та його початкових параметрів у точці 1. Дійсна робота зрідження залежить від використаної системи зрідження та ефективності її компонентів.

Мінімальна та дійсна роботи зрідження деяких газів наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Газ	Мінімальна та дійсна роботи зрідження деяких газів	
	Робота зрідження від стану P=1 ата, T=300 К, кВт·год/кг	
	мінімальна, $l_{\min}$	дійсна, l
Азот, N ₂	0,213	1,2...1,8
Кисень, O ₂	0,177	1,0...1,5
Водень, H ₂	3,31	22...42

Розділення газової суміші використовується зокрема на установках розділення повітря. З термодинамічної точки зору воно аналогічне до стиснення кожного з її компонентів від парціального тиску у суміші до загального тиску суміші. Таким чином, мінімальна робота розділення суміші (на 1 моль):

$$l_{p_{\min}} = -RT_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln(x_i), \quad (19)$$

де R = 8,31 Дж/К – універсальна газова стала; x_i – молярна частка у суміші i-го компонента.

3.2.Ефективність кріогенних систем.

Дійсна робота, необхідна для зрідження значно перевищує мінімальну (див. табл. 1). Причини цього різні.

Втрати через недорекуперацію виникають через неідеальність процесу у теплообмінних апаратах. Для того, щоб йшов теплообмін, потрібно, щоб температура гарячого теплоносія завжди була вищою ніж холодного. Отже холодний теплоносії не догріється до початкової температури гарячого теплоносія на деяку різницю температур ΔT_{np} , яку називають недорекуперацією (рис 9). Втрати через недорекуперацію становлять:

$$q_{np} = c_p \Delta T_{np} \quad (20)$$

де c_p – ізобарна теплоємність газу, кДж/(кг·К)

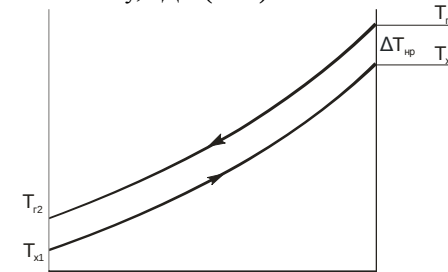


Рис. 8. Недорекуперація у теплообмінниках

Для зменшення цих втрат можна збільшити площу поверхні теплообміну, або підвищити ефективність теплообмінника. Проте збільшення площі теплообмінника підвищує його вартість. Тому слід вибирати величину недогріву (особливо для ступеня остаточного охолодження) для верхнього ступеня ($T_1=T_0$) $\Delta T_{np}=5...10$ К, для ступеня остаточного охолодження гелієвих машин $\Delta T=0,5...1,0$ К. Для орієнтовних розрахунків можна приймати $\Delta T_{np}=(0,03...0,06)T_1$.

Втрати через теплонадходження з довкілля до низькотемпературної зони, $q_{тп}$. Теплонадходження підвищують ентальпію робочого тіла, через що воно недоохолоджується до потрібної температури під час розширення у детандері. Для зменшення теплонадходжень слід використовувати ефективну теплоізоляцію, хоча це і здорожує систему.

Гідравлічні втрати ΔP виникають внаслідок тертя під час руху у трубах та каналах, через що знижується різниця тисків p_2-p_1 та зменшується холодопродуктивність циклу. Для зменшення уникнення надмірних втрат рекомендується приймати втрати для потоку низького тиску $\Delta P_1=20...40$ кПа, для потоку високого тиску – $\Delta P_2=100...300$ кПа ($P_2>1$ МПа) або $\Delta P_2=30...60$ кПа ($P_2<1$ МПа).

Втрати у компресорах, детандерах, насосах тощо виникають через необоротність процесів, які визначаються коефіцієнтом корисної дії (ККД) обладнання ($\eta_{компр}$, $\eta_{дет}$, тощо). Рекомендується використовувати у кріогенних системах компресори з ізотермічним ККД для компресорів 0,55 – 0,65 та детандери з ізентропійним ККД 0,7 – 0,8 (для поршневих) або 0,72 – 0,85 (для турбодетандерів).

Додаткові втрати: витікання через нещільності, тепловиділення під час деяких процесів у низькотемпературній зоні (конверсія, відігрівання, адсорбція тощо).

Показниками ефективності реального циклу є: реальна затрата роботи (l_p), холодильний коефіцієнт (ϵ_p) та термодинамічний ККД (η_0) дійсного циклу:

$$\eta_0 = \epsilon_p / \epsilon_{ид} \quad (21)$$

де $\epsilon_{ид}$ – холодильний коефіцієнт ідеального циклу. Для систем зрідження:

$$\epsilon_{ид} = \frac{h_1 - h_f}{l_{min}} \quad (22)$$

Для рефрижераторних систем ідеальним є цикл Карно, отже

$$\epsilon_{ид} = \frac{T_x}{T_0 - T_x} \quad (23)$$

4. ВЛАСТИВОСТІ ТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Для конструювання кріогенних систем слід знати, як змінюватимуться властивості матеріалів при кріогенних температурах. Температурні залежності для більшості властивостей можна екстраполювати і в кріогенну область (наприклад значення модуля Юнга). Але є ряд специфічних явищ, що проявляються лише у кріогенній області, як то різке зменшення теплоємності, надпровідність, пластично-крихкий перехід тощо.

4.1. Механічні властивості.

Механічні властивості матеріалів є важливими для конструювання деталей кріогенних систем, з'єднувальних трубопроводів, посудин для зберігання кріорідин.

Границя плинності (напруга, що викликає залишкову деформацію понад 0,2%) зі зниженням температури зростає.

Границя міцності на розрив та модуль пружності (модуль Юнга) зі зниженням температури також зростають, причому відомі графічні та розрахункові залежності можна екстраполювати у кріогенну область.

Границя стомлюваності (напруга при якій після змінного за напрямом згину протягом заданої кількості циклів матеріал руйнується і з'являються мікротріщини на поверхні) зростає в усіх металів крім алюмінію.

Пластичність (ударна в'язкість). Пластичним вважається матеріал, який перед руйнуванням може подовжуватися не менше ніж на 5%, наприклад гума. Зниження температури значно знижує пластичність переважної більшості матеріалів – вони стають крихкими. Так для вуглецевої сталі при 110 К відбувається пластично-крихкий перехід (об'ємноцентрована кристалічна решітка переходить у гранецентровану), внаслідок чого різко падає ударна в'язкість і сталь стає крихкою. Тому для кріогенних температур вуглецева сталь практично не застосовується. Подібне явище спостерігається і для пластмас та гум (крім тефлону) – вони також стають крихкими при температурах нижчих ніж певна температура переходу, індивідуальна для кожного матеріалу.

4.2. Теплофізичні властивості

Теплопровідність речовини – це її здатність проводити теплоту. Існує три основні механізми теплопровідності:

- 1 – рух вільних електронів (наприклад у металевих провідниках);
- 2 – передавання енергії коливань кристалічної решітки або молекул;
- 3 – рух молекул.

Основним механізмом теплопровідності газів є рух молекул (у багатоатомних – ще й передавання енергії обертання молекул), у рідинах – передавання енергії коливання молекул. Для твердих тіл механізми складніші – у кристалічних твердих тілах основним засобом перенесення теплоти є коливання кристалічної решітки, а у металах також рух вільних електронів.

Числове значення теплопровідності визначається коефіцієнтом теплопровідності λ , що вимірюється у Вт/(м²К).

З молекулярно-кінетичної теорії для газів

$$\lambda = \frac{1}{8} (9k - 5) \rho c_v \bar{v} l_{\text{сер}} \quad (24)$$

де $k = c_p / c_v$ – показник адиабати, ρ – густина, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi}}$ – середня швидкість руху молекул; $l_{\text{сер}}$ – середня довжина вільного пробігу молекул. Для газів $\rho l_{\text{сер}} \approx \text{const}$. Зі зниженням температури теплопровідність газів зменшується.

Теплопровідність зріджених водню та гелію зниженням температури зменшується, а решти кріорідин – зростає.

Для твердих тіл за рахунок меншої кількості ступенів свободи руху молекул:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho c_v \bar{v} l_{\text{сер}}. \quad (25)$$

Основну роль у теплопровідності металів при кімнатних температурах відіграє рух вільних електронів. Оскільки маса і швидкість руху електронів практично не змінюються, теплопровідність металів при кімнатних температурах мало залежить від зміни температури. При температурах близько 77 К (зріджений азот) внесок фононної теплопровідності стає відчутним, тому теплопровідність починає зростати. Зростання йде доти, доки довжина вільного пробігу електронів не стане порівняною з розмірами зразка матеріалу. Після цього теплопровідність металів знижується.

Сплави і нечисті метали мають хаотичну структуру, атоми домішок та різномірних металів призводять до розсіювання енергії. Ефект максимуму тут відсутній. Теплопровідність таких матеріалів зі зниженням температури монотонно знижується.

Питома теплоємність речовини – це кількість теплоти, що потрібно підвести до 1 кг речовини щоб підвищити її температуру на 1 К. Якщо у процесі нагрівання сталим залишається тиск, то говорять про ізобарну теплоємність c_p , а якщо об'єм – то про ізохорну c_v .

Теплоємність можна з достатньою точністю розрахувати за математичною моделлю Дебая. У ній прийнято допущення, що тверде тіло є безперервним середовищем. З теорії Дебая для кристалічного одноатомного тіла теплоємність:

$$c_v = \frac{9RT^3}{\theta_D^3} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x dx}{(e^x - 1)^2} = 3R \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 f_D \left(\frac{T}{\theta_D} \right) \quad (26)$$

де: f_D – функція Дебая; θ_D – температура Дебая (температурна межа, нижче якої спостерігається вплив квантових ефектів у теплоємності),

$$\theta_D = \frac{h\nu_m}{k} \quad (27)$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ – стала Планка, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – стала Больцмана; ν_m – максимальна частота коливань кристалічної решітки.

За низьких температур ($T < (\theta_D/12)$) функція Дебая $f_D(0) = \text{const} = 0,8\pi^4$, тоді

$$c_v = 233,78R \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \quad (28)$$

Наведені вище формули стосуються фононної теплоємності, тобто теплоємності кристалічної решітки матеріалу. У металах є вільні електрони, що також впливають на загальну теплоємність. Електронна теплоємність металу:

$$c_{v,e} = \gamma T, \quad (29)$$

де γ – коефіцієнт електронної теплоємності (див. табл.2). При кріогенних температурах внесок електронної теплопровідності у загальну значний. Так для міді при температурі 1 К електронна теплоємність у 4 рази перевищує фононну.

Таблиця 2

Температура Дебая θ_D та коефіцієнт електронної теплоємності γ для деяких речовин

Речовина	θ_D , К	γ , мДж/(К·моль)	Речовина	θ_D , К	γ , мДж/(К·моль)
Алюміній	426	1,36	Ніобій	320	7,9
Вольфрам	465	1,3	Олово	195	1,75
Залізо	464	3,1	Титан	420	3,4
Золото	165	0,74	Хром	610	1,47
Кремній	640	–	Свинець	96	3,1
Мідь	344	0,678	Графіт	420	0,01
Нікель	440	7,0	Алмаз	2230	–

Магнітна теплоємність матеріалу важлива для магнітних кріорефрижераторів, на яких отримують температури нижче 1 К (див. лекцію 10). Її причиною є взаємодія магнітних диполів. При низьких температурах енергія цієї взаємодії ϵ_m має такий самий порядок як і тепла енергія kT . Характерна температура, за якої ϵ_m максимальна:

$$\theta_s = \epsilon_m / k. \quad (30)$$

Тоді магнітна теплоємність речовини:

$$c_m = 0,25R (\theta_s / T)^2. \quad (31)$$

Для деяких речовин існують аномалії теплоємності – порушення монотонності температурної залежності – спричинені різними факторами (фазові переходи у твердих тілах, структурні переходи у сплавах, перехід до надпровідного стану, спінові переходи та ін.). Для таких речовин теплоємність визначають дослідним шляхом.

4.3. Електромагнітні властивості

Електромагнітні властивості речовин значно залежать від температури. Інколи вплив температур настільки значний, що виникають специфічні ефекти, як то надпровідність.

Електропровідність – величина обернена до електричного опору

$$\sigma = 1/R. \quad (32)$$

Зі зниженням температури вповільнюється рух іонів кристалічної решітки провідника, таким чином менше перешкод вони створюють для електронів. Для температур вищих за температуру Дебая опір пропорційний T^{-1} . При нижчих температурах проявляються дефекти кристалічної ґратки. Загальний опір можна розділити на дві частини:

$$R = R_0 + R_T \quad (33)$$

де $R_0 = \text{const}$ – залишковий опір, що спричиняється розсіюванням електронів на домішках та дефектах кристалічної решітки, а R_T – складова опору, що залежить від температури. Другу складову можна визначити наприклад за формулою Блоха (для $T < (\theta_D/12)$):

$$\frac{R_T}{R_{T=\theta_D}} = \frac{T^5}{\theta_D^5} \int_0^{\theta_D/T} \frac{4,22x^5 dx}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} \quad (34)$$

або за формулою Грюнейзена:

$$\frac{R_T}{R_{T=\theta_D}} = 1,056 \left(\frac{T}{\theta_D} \right) f_D \left(\frac{T}{\theta_D} \right) \quad (35)$$

Відношення електричного опору при 8К до опору при 273 К становить для міді: 0.004, для срібла – 0.0066, для заліза – 0.0084, для алюмінію – 0.035

Напівпровідники мають дещо інший механізм електричної провідності (дірчаста провідність), який передбачає, що електрони повинні мати певну енергію, для подолання енергетичного бар'єру. Тому є різке падіння провідності напівпровідників зі зниженням температури у інтервалі 1–10 К.

4.4. Надпровідність

У 1911 Х. Камерлінг-Оннес, досліджуючи електричний опір ртуті при низьких температурах, зазначив, що при температурі 4,15 К вона стрибкоподібно втрачала опір. Через два роки він визначив температури надпровідного переходу свинцю, олова і талію.

Надпровідність – одночасне зникнення електричного опору та поява досконалих діамagnetичних якостей (виштовхування магнітного поля з об'єму матеріалу) при охолодженні матеріалу до певної критичної температури (рис. 9). У такому стані спостерігається багато цікавих явищ. Наприклад, електричний струм запущений у кільце з надпровідного матеріалу продовжує текти і після відімкнення напруги, а магніт, що падає на надпровідну пластину, зависає у повітрі: його поле збуджує у металі кільцевий струм, а струм створює магнітне поле, що відштовхує магніт. Струм продовжує текти, а магніт висіти доти, доки метал охолоджений до надпровідного стану.

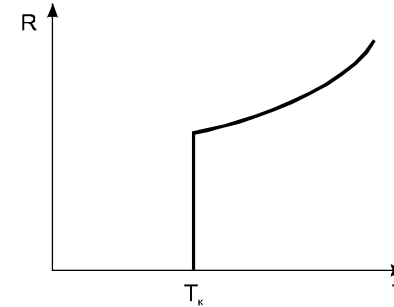


Рис. 9. Критична температура надпровідника

Природу надпровідності пояснили у 1956 р американські фізики Дж. Бардін, Л. Купер і Дж. Шріффер, створивши теорію БКШ, що отримала назву за першими літерами їх прізвищ. За цією теорією провідник – це кристалічна решітка, у вузлах якої перебувають іони, а втрачені ними електрони створюють „електронний газ” – щільну хмару з часток, що заповнює весь кристал. Електрони незалежно один від одного рухаються вздовж провідника, переносючи заряд – виникає електричний струм. Під час руху вони взаємодіють між собою та з решіткою, тому виникає електричний опір, для подолання якого слід прикладати до провідника напругу.

У надпровіднику електрони взаємодіють з іонами решітки (рис. 10). Перший електрон „зближує” іони і у „звужену” область за рахунок більшого позитивного заряду втягується другий електрон. Енергія, яку витрачає перший електрон на деформацію решітки, без втрат передається другому електрону. Така пара (так звана „куперівська пара”) рухається по решітці, обмінюючись енергією через фоони (кванти коливальних рухів решітки), проте не втрачаючи енергії в цілому. Сумарний spin куперівської пари дорівнює нулю – виникають бозони. У 1 см³ надпровідника міститься близько 10²⁰ куперівських пар, що утворюють бозонну рідину – макроскопічно впорядковану структуру, що поводить як одна частка і може „текти” провідником без опору, а за рахунок заряду електронів створює електричний струм. З підвищенням температури енергія електронів зростає і куперівські пари розпадаються. Надпровідний стан фізики називають макроскопічним квантово-механічним станом. За відсутності зовнішнього магнітного поля метали та сплави переходять у надпровідний стан при сталій температурі, що зветься температурою переходу в нульовому полі T_0 . Серед чистих металів найвищу температуру переходу має технецій (11,2 К).

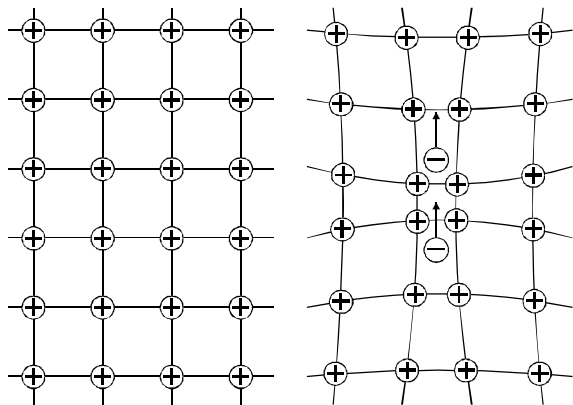


Рис. 10. Куперівська пара електронів.

Одразу після відкриття надпровідності у 1911 р. Камерлінг-Оннес спробував отримати сильне магнітне поле у надпровідній котушці, проте з'ясував, що у надпровідному стані матеріал стає діамagnetиком, тобто магнітне поле виштовхується з матеріалу (рис 11).

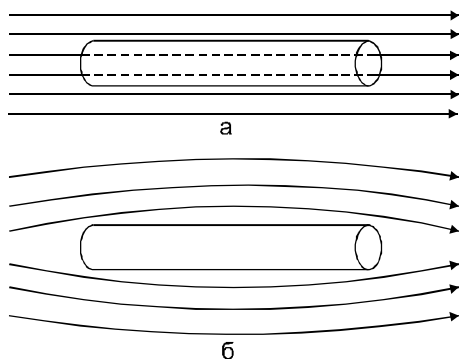


Рис. 11. Взаємодія магнітного поля зі звичайним (а) і надпровідним (б) стержнем

Механізм цього виштовхування відкрив німецький фізик В.Мейснер. Він з'ясував, що у надпровіднику, який вміщений у магнітне поле виникають колові струми. Ці струми створюють власні магнітні поля, що виштовхують зовнішнє поле з надпровідника.

Цей ефект вже використовується для створення підшипників та електродвигунів, у яких відсутнє тертя. Проте якщо підвищувати напруженість магнітного поля то надпровідний стан руйнується. Магнітне поле, що знищує

надпровідність називається критичним полем. Для різних надпровідників воно змінюється від кількох десятків до кількох сотень тисяч гаусів. При температурі переходу критичне поле дорівнює нулю, а при абсолютному нулі воно максимальне.

Електричний струм певної сили під час проходження крізь надпровідник створить критичне поле. Отже для надпровідника існує критичний (максимальний) струм, що може крізь нього проходити:

$$I_c = H_c \pi d \quad (36)$$

де H_c – напруженість критичного магнітного поля; d – діаметр провідника.

Такі властивості характерні для чистих матеріалів – надпровідників 1-го роду. Критичні поля для таких надпровідників становлять від 20 до 800 Гс.

Сплави та матеріали з домішками відхиляються від поведінки чистого надпровідника. Надпровідник складної будови (з домішками) в магнітному полі пронизаний великою кількістю мікроскопічних магнітних трубок, навколо кожної з яких тече коловий струм. Ці вихори (абрикосовські вихори) утворюють решітку з трикутними ячейками. Надпровідні шари витісняють магнітне поле у шари з нормальною провідністю, внаслідок чого матеріал стає проникним для магнітного поля, маючи водночас нульовий електричний опір. За певних умов така структура може виявитися стійкою. Вона отримала назву „надпровідник 2-го роду”. А.А.Абрикосов показав, що насправді у реальній речовині немає виділених шарів. У ній утворюється ниткоподібна структура магнітного поля, що складається з магнітних каналів, які мають нормальну провідність. Магнітний потік замкнений всередині цих каналів, у шар надпровідного матеріалу його не випускають колові мейснерівські струми, що оточують кожен нитку – абрикосовські вихори.

Магнітний потік квантований – у кожній нитці міститься один квант магнітного поля. Коли напруженість магнітного поля стає більшою за певну величину H_{k2} (може сягати 100 кГс) речовина виходить з надпровідного стану. А якщо напруженість магнітного поля менша за певну величину H_{k1} (до 500 Гс), речовина стає звичайним надпровідником 1-го роду.

Експериментуючи з металокерамічним надпровідником 2-го роду La – Ba – Cu – O дослідники “IBM Laboratories” (Цюріх) К.Мюллер і Дж. Беднорц у 1986 р. відкрили явище високотемпературної надпровідності (температура переходу для цього матеріалу становила 35 К). За це відкриття вони отримали Нобелівську премію у 1987 р. Далі з'ясувалося, що насправді критична температура для цього матеріалу становить 58 К (перші результати були погіршені незначними домішками свинцю). Вже у 1988 р. у США у складі кераміки замінили лантан на ітрій, що підвищило критичну температуру до 92 К. Подальші досліді в усьому світі привели до відкриття металокерамічних надпровідників з температурами переходу понад 100 К. Така надпровідність отримала назву високотемпературної (ВТНП). На даний час розроблені надпровідники на базі металокерамік з критичною температурою до 164 К. Головною перевагою високотемпературних керамічних надпровідників є те, що

їх можна охолоджувати порівняно дешевим зрідженим азотом (це відкриває шлях до широкого використання ВТНП у промисловості), а недоліком – мала міцність. Тривають дослідження, що мають на меті розроблення матеріалів, що можуть перебувати у надпровідному стані за кімнатної температури (КТНП). Іншим напрямом досліджень є вивчення властивостей дибориду магнію (MgB_2), що має критичну температуру близько 40 К, та подібних сполук. На відміну від металокераміки вони мають просту будову і є дешевшими у виготовленні.

У надпровідному стані змінюються властивості матеріалу: теплоємність різко зростає, теплопровідність – різко падає (крім деяких сплавів Pb-Bi), бо надпровідні електрони вже не беруть участь у перенесенні теплоти, термоелектричні ефекти зникають.

Характерним для надпровідників є ефект Джозефсона (1962). По-перше, через тунельний надпровідний контакт (два надпровідника, розділені шаром діелектрика) може протікати надпровідний струм. Критичне значення цього струму залежить від зовнішнього магнітного поля. По-друге, якщо струм через контакт перевищує критичний струм переходу, то контакт стає джерелом високочастотного електромагнітного випромінювання. Перший з цих ефектів називають стаціонарним ефектом Джозефсона, другий – нестаціонарним. Обидва вони використовуються у виробництві контрольно-вимірювальних пристроїв.

Характеристики різних надпровідників подані у табл. 3.

Таблиця 3

Критичні температури і поля для різних надпровідників

Матеріали	Критична температура, К	Критичні поля (при 0 К), Гс*
<i>Надпровідники 1-го роду</i>		
Родій	0,000325	0,049
Титан	0,39	60
Кадмій	0,52	28
Цинк	0,85	55
Галій	1,08	59
Талій	2,37	180
Індій	3,41	280
Олово	3,72	305
Ртуть	4,15	411
Свинець	7,19	803
<i>Надпровідники 2-го роду</i>		
Ніобій	9,25	1735 / 4040
Nb_3Sn	18,1	– / 220 000
Nb_3Ge	23,2	– / 400 000
$\text{Pb}_1\text{Mo}_{5,1}\text{S}_6$	14,4	– / 600 000
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	90–100	1000** / 1 000 000**

* Для надпровідників 2 роду подано у вигляді H_{c1} / H_{c2}

** Екстрапольовано до абсолютного нуля.

Надпровідність широко використовують як у лабораторних, так і у промислових установках: надпотужні магніти, високочутлива вимірювальна апаратура, надпровідні потужні електроприлади, транспорт на магнітній подушці та ін. Детальніше застосування надпровідності розглядатимуться у лекції 11.

ЛЕКЦІЯ 5

КРІОГЕННІ РІДИНИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Кріогенними рідинами (кріорідинами) називають речовини, що перебувають у рідкому стані при кріогенних температурах. Їх використовують як холодоносії, холодоагенти та охолодні середовища у кріогенних технологіях. Основні властивості кріорідин наведені у табл. 4.

Таблиця 4.

Основні властивості кріорідин					
Назва	Атомна вага*	T _{кип} , К	T _{зам} , К	ρ, кг/м ³	г, кДж/кг
Метан	16	111,7	90,7	424,5	509,5
Кисень	16, 17, 18	90,18	54,4	1141	212,8
Аргон	36, 38, 40	87,3	83,8	1394	163,0
Фтор	19	85,24	53,5 (жовтий) 45,6 (білий)	1507	175,5
Азот	14, 15	77,36	63,2	807	199,3
Неон	20, 21, 22	27,09	24,54	1204	880
Водень	1, 2, 3	20,3	14,0	70,9	525 (конверсія) 447 (кипіння)
Гелій-4	4	4,224	не твердне	124,8	20,9
Гелій-3	3	3,19	0,32К P=2,93 МПа	58,9	8,49

*жирним шрифтом виділена атомна маса найпоширенішого ізотопу

Більшість кріорідин добувають з повітря, яке є сумішшю багатьох газів. Стандартний склад повітря поблизу поверхні Землі наведено у табл. 5. Дійсний склад може відрізнятися від стандартного – наприклад вміст кисню поблизу екватора вищий ніж у полярних областях.

Азот (N₂) – основна складова повітря (78 об%). Він дешевий, нетоксичний, має низьку хімічну активність. Саме тому зріджений азот – прозора рідина з нормальною температурою кипіння 77 К – найчастіше використовується у кріогенних системах заморожування (у тому числі і харчових продуктів). При зберіганні зрідженого азоту не слід допускати його контакту з повітрям (а також з вуглеводнями), бо з повітря може сконденсуватися кисень і змішатися з азотом, змінивши його властивості.

Кисень (O₂) – також займає істотну частку в повітрі (21 об%). Зріджений кисень – блакитна рідина (колір дає полімер O₄), що має слабкі магнітні властивості. Завдяки останній властивості є можливість визначати наявність кисню у сумішах. Кисень має високу хімічну активність, вибухонебезпечний при контакті з мастилами, жирами, вугіллям, деревиною, асфальтом,

тканинами. При концентраціях понад 60% кисень токсичний. Використовувати чистий кисень для дихання можна лише за зниженого тиску.

Таблиця 5

Склад сухого атмосферного повітря поблизу поверхні Землі		
Газ	Об'ємна частка, %	Масова частка, %
Азот, N ₂	78,087	75,52
Кисень, O ₂	20,95	23,15
Аргон, Ar	0,93	1,282
Вуглекислий газ, CO ₂	0,03	0,046
Неон, Ne	18·10 ⁻⁴	12,5·10 ⁻⁴
Гелій, He	5,24·10 ⁻⁴	0,72·10 ⁻⁴
Вуглеводні	2,03·10 ⁻⁴	1,28·10 ⁻⁴
Метан, CH ₄	1,5·10 ⁻⁴	0,8·10 ⁻⁴
Криптон, Kr	1,14·10 ⁻⁴	3,3·10 ⁻⁴
Водень, H ₂	0,5·10 ⁻⁴	0,035·10 ⁻⁴
Закис азоту, N ₂ O	0,5·10 ⁻⁴	0,8·10 ⁻⁴
Ксенон, Xe	0,08·10 ⁻⁴	0,36·10 ⁻⁴
Озон, O ₃	0,01·10 ⁻⁴	0,015·10 ⁻⁴
Радон, Rn	6·10 ⁻¹⁸	7·10 ⁻¹⁷

Аргон (Ar) – прозора рідина, яку добувають з повітря (0,93 об%); інертний, нетоксичний. Газоподібний аргон використовують у техніці для створення інертних середовищ (наприклад під час електрозварювання).

Неон (Ne) – прозора рідина, яку добувають з повітря (18·10⁻⁴ об%). Інертний, нетоксичний. Доцільно використовувати зріджений неон у кріорефрижераторах, бо маючи нормальну температуру кипіння порівняну з воднем, неон має вищу теплоту випаровування.

Метан (CH₄) – горючий газ, основна складова природного газу. З повітрям метан утворює вибухонебезпечні суміші. Метан використовують у хімічній промисловості, а також як паливо. Для зберігання та перевезень його зріджують. Зріджений метан – прозора рідина.

Фтор (F₂) – світло-жовта рідина. Має високу токсичність. Дуже активний, реагує з усіма органічними речовинами, з вуглеводнями – зі спалахом. У середовищі фтору горять більшість неорганічних речовин. При контакті з більшістю металів утворює на поверхні тонку плівку фториду, що захищає метал, проте при зберіганні у металевих контейнерах за певних умов можливе загоряння контейнера.

Водень (H₂) – прозора рідина, яку найчастіше добувають з природного газу методом каталітичної конверсії вуглеводнів у присутності водяної пари. Водень горючий у присутності кисню, вибухонебезпечний. Для зрідженого водню додаткова небезпека вибуху виникає через можливість утворення детонуючих сумішей „твердий кисень – рідкий водень” та „тверде збагачене

киснем повітря – рідкий водень”. Особливістю водню є те, що у звичайному стані у 75% молекул водню спіни ядер – двох протонів – спрямовані в один бік (такий водень зветься ортоводнем), а у 25% молекул – у протилежні боки (параводень). У рідкому водні відбувається повільний орто-пара-перехід (конверсія), ортоводень перетворюється на параводень, (у рідкому водні – 99,8% параводню), при цьому виділяється теплота конверсії (706 кДж/кг). Теплота конверсії вища за теплоту випаровування, тому зріджений водень навіть у ідеально теплоізолюваній посудині може повністю випаруватися внаслідок поступового проходження конверсії. Для уникнення цього проводять прискорену конверсію у присутності твердих каталізаторів (активованого вугілля, оксидів металів, гідроксидів заліза, хрому, нікелю, марганцю) на декількох температурних рівнях – найчастіше 65...70 К та 20 К.

Гелій-4 (^4He) – прозора рідина, яку добувають з природного газу (0,2...2об%). Після охолодження шляхом відкачування пари нижче 2,17 К у рідкому гелії відбувається λ -перехід до He-II – суміші звичайної та надплинної компоненти (надплинна компонента складається з атомів гелію, що мають нульову енергію, її вміст зростає зі зменшенням температури). В'язкість надплинної компоненти практично відсутня – вона “організовано” протікає у отвори діаметром до 0,5 мкм, непроникні навіть для газу, бо у газі молекули рухаються хаотично. Теплопровідність надплинної компоненти дуже висока (до 105 кВт/(м·К)). Насправді теплота у ній переноситься за рахунок дуже інтенсивної конвекції. Надплинна компонента виявляє цілий ряд цікавих властивостей (див. рис. 12): затоплений струмінь (надплинна компонента вповзає у колбу назустріч потоку звичайної рідини, що після нагрівання втрачає надплинність), “товсті” плівки (рідкий He-II утворює плівку товщиною близько 100 атомів на стінках пробірки і тече без в'язкісного опору, у тому числі вгору), фонтанування (нагріваючись рідина втрачає надплинність, надплинна компонента надходить крізь поруватий матеріал іззовні для вирівнювання концентрації, а звичайна компонента не може пройти крізь пори, тому у посудині зростає тиск і рідина фонтанує на висоту до 30 см). Явище надплинності незалежно відкрили та теоретично обґрунтували П.Л.Капіца (СРСР), за що отримав Нобелівську премію у 1978 р., Г.Ф.Аллен та А.Д.Мейснер (США).

He-II за рахунок низької в'язкості сам перетікає з холодніших областей до тепліших. Тому у ньому виникає “другий звук”, що являє собою місцеві коливання температури, а не тиску, як для звичайного звуку. Хвилі другого звуку можуть утворювати стоячі хвилі, відбиватися.

Гелій-3 (^3He) – прозора рідина, отримують як побічний продукт розпаду радіоактивного тритію. Суміш рідких ^3He і ^4He при $T < 0.827\text{K}$ сама розділяється на 2 фази – надплинну і нормальну – з поглинанням теплоти. Цей ефект використовують у рефрижераторах розчинення.

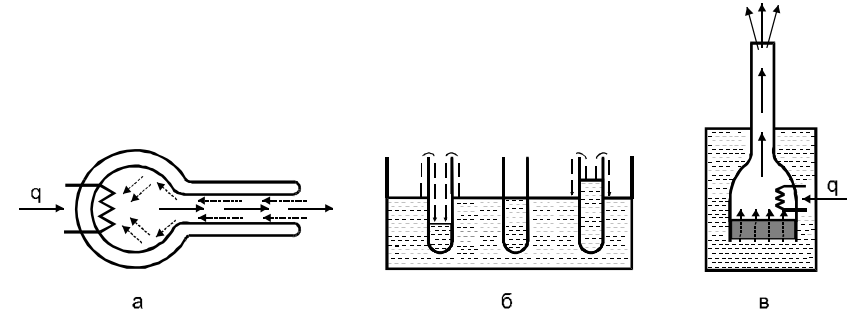


Рис. 12. Ефекти надплинності у He-II: а – затоплений струмінь; б – “товсті” плівки; в – фонтанування.

6. СИСТЕМИ ЗРІДЖЕННЯ ГАЗІВ

6.1. Ефективність систем зрідження

Як уже зазначалося, одним з основних завдань криогенної техніки є зрідження газів. До системи зрідження (рис. 13) надходить газ масою m , і за рахунок прикладання роботи $-W$ частково зріджується. Маса зрідженого газу становить m_f .

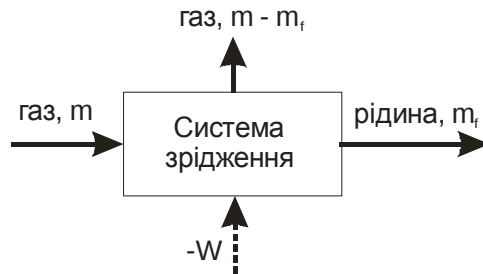


Рис. 13. Принципова схема системи зрідження

Гази можна зріджувати різними способами, причому з різною термодинамічною ефективністю. У термодинамічно ідеальній системі весь стиснений газ зріджується ($y=1$). Проте для роботи такої системи, скажімо, для зрідження азоту від тиску $P_1 = 0.1$ МПа та температури $T_1 = 300$ К необхідний тиск стиснення $P_2 \approx 70-80$ ГПа, що недосяжний у сучасних технічних засобах. Тому для зрідження газів використовують інші системи.

Ефективність систем зрідження оцінюють за допомогою таких параметрів:

Частка зрідженого газу з загального потоку:

$$y = \frac{m_f}{m} \quad (37)$$

Витрата роботи на стиснення одиниці маси газу:

$$l = -\frac{W}{m} \quad (38)$$

Витрата роботи на зрідження одиниці маси газу:

$$l_o = -\frac{W}{m_f} = \frac{l}{y} \quad (39)$$

Ексергетичний ККД

$$\eta_e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{id}}, \quad (40)$$

де ε , ε_{id} – холодильні коефіцієнти відповідно оцінюваної та ідеальної систем зрідження (див. лекцію 3).

$$\varepsilon_{id} = \frac{h_1 - h_f}{l_{min}} \quad (41)$$

6.2. Системи зрідження газів крім водню, гелію та неону.

Більшість газів можна зрідити у порівняно простих системах зрідження.

Система Лінде – Хемпсона, або система з одноразовим дроселюванням (рис. 14) є однією з найпростіших систем зрідження. У ідеальній системі Лінде-Хемпсона газ надходить до компресора, де ізотермічно стискається (1–2). Потік газу високого тиску проходить крізь теплообмінник, де охолоджується (2–3) потоком газу низького тиску, що повертається на компресор. Після охолодження газ ізотермічно дроселюється у дросельному вентилі (3–4) і при цьому охолоджується та частково зріджується. Рідина, що утворилася, відділяється у віддільнику рідини та відводиться з системи, а холодний газ (потік низького тиску) повертається на компресор через теплообмінник, нагріваючись у ньому до температури T_1 .

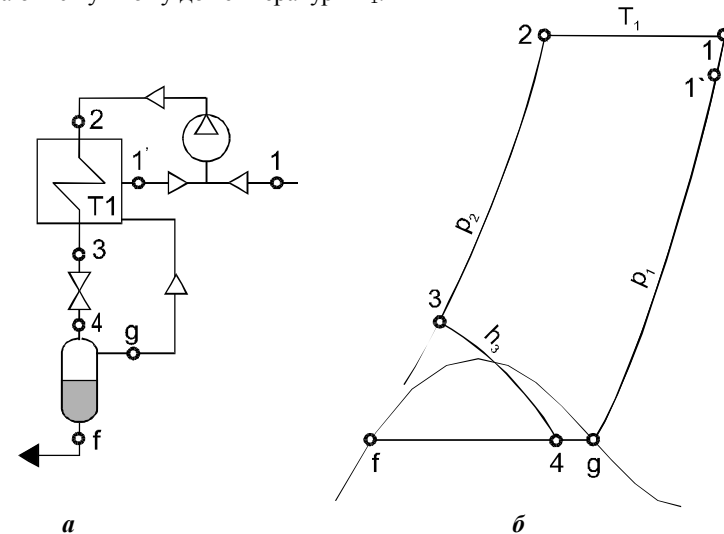


Рис. 14. Схема та цикл системи зрідження газів Лінде-Хемпсона (а – принципова схема, б – цикл у діаграмі T-s).

Подібні системи розробили К.Лінде та В.Хемпсон і відрізнялися вони лише конструкцією теплообмінника – Лінде використав теплообмінник типу «труба в трубі» (скручений у змійовик), а Хемпсон – кожухозмійовиковий.

У реальних системах процес стиснення багатоступеневий, тобто розділяється на почергові адіабатне (політропне) стиснення та ізобарне охолодження до температури, що майже дорівнює температурі довкілля (T_1). Також у теплообміннику наявна недорекуперація (див. лекцію 3)

Вихід зрідженого газу за заданих умов (з урахуванням недорекуперації та теплонадходжень) для системи зрідження газів Лінде-Хемпсона становить:

$$y = \frac{h_1 - h_2 - q_{\text{тн}}}{h_1 - h_f} \quad (42)$$

З (42) для отримання максимального виходу зрідженого газу треба мінімізувати ентальпію h_2 . Отже найдоцільніше, щоб $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_{T=T_1} = 0$, тобто точка 2 лежала на кривій інверсії.

Для повітря при $p_1=300$ К оптимальний тиск $p_2=40$ МПа. На практиці (насамперед з міркувань міцності конструкційних матеріалів та здешевлення установки) використовують $p_2 \approx 15 \dots 20$ МПа.

Система Лінде – Хемпсона з попереднім охолодженням (рис. 15) порівняно з попередньою має зміни. У ній газ після стиснення (точка 2) охолоджується спочатку у теплообміннику Т1 зворотнім потоком газу до параметрів у точці 2''. Потім здійснюється попереднє охолодження газу у випарнику кріорефрижератора або ванні з кріоридиною В, до температури у точці 2'. Охолоджений стиснений газ надходить на теплообмінник Т2, де охолоджується до температури у точці 3 зворотнім потоком незрідженого газу, який нагрівшись подається на теплообмінник Т1. Подальші процеси не відрізняються від попередньої системи: газ дроселується (3–4), частково зріджуючись, рідина відділяється і видаляється з системи, а газ через теплообмінники Т2 та Т1 повертається на стиснення. Видалений зріджений газ компенсується свіжим, що подається на вхід компресора.

Вихід зрідженого газу для системи Лінде – Хемпсона з попереднім охолодженням:

$$y = \frac{h_{5'} - h_{2'} - q_{\text{тн}2}}{h_{5'} - h_f} \quad (43)$$

Він буде вищим ніж для звичайної системи Лінде – Хемпсона, бо за рахунок додаткового відведення теплоти ентальпія газу у точці 3 (а отже і у точці 4) зменшиться. Таким чином точка 4 буде розташована ближче до точки f, тобто вміст рідини у газорідинній суміші після дроселювання буде вищим.

Система Лінде – Хемпсона з подвійним дроселюванням (рис. 16) має не один, а два дросельні вентилялі. Газ стискається у першому ступені компресора (1–2), потім у другому (2–3), охолоджується у трьохпотоковому теплообміннику (3–4) і подається на перше дроселювання (4–5). Тут газ дроселується не до тиску p_1 , а до проміжного тиску p_2 і охолоджується частково зріджуючись. Утворена рідина відділяється і подається на друге дроселювання до тиску p_1 (7–8), а охолоджений газ через трьохпотоковий теплообмінник повертається на всмоктування другого ступеня компресора (точка 2). Рідина після другого дроселювання відділяється, а газ через трьохпотоковий теплообмінник повертається на компресор 1 ступеня (точка 1). Циркулюючий потік газу (2–3–4–5–6–2) підвищує ефективність процесу охолодження у теплообміннику, а завдяки дворазовому дроселюванню (4–5–7–8) зменшуються втрати рідини при дроселюванні, зростає її вміст у газорідинній суміші.

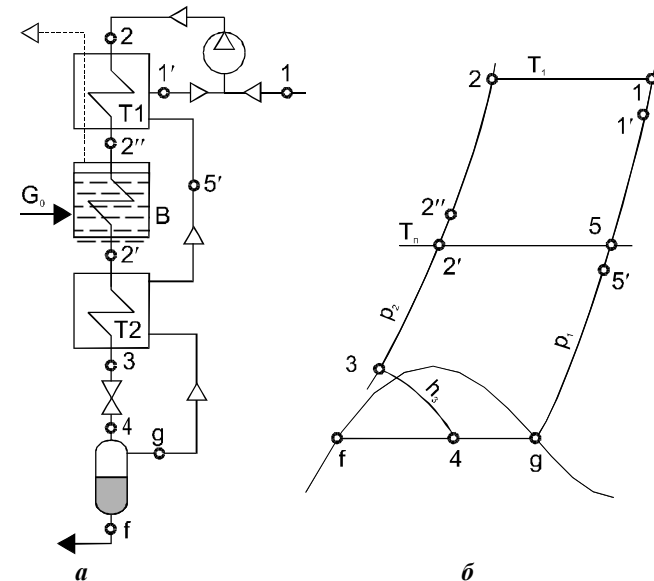


Рис. 15. Принципова схема (а) та цикл у діаграмі Т-*s* (б) системи зрідження газів з одноразовим дроселюванням і попереднім охолодженням

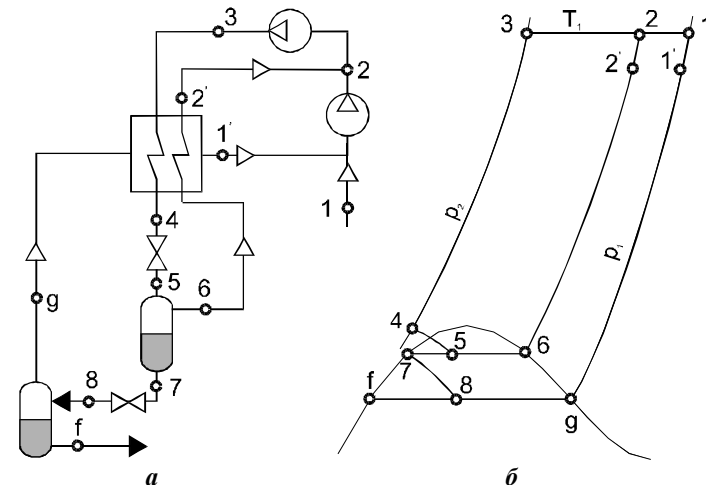


Рис. 16. Принципова схема (а) та цикл у діаграмі Т-*s* (б) системи зрідження газів з подвійним дроселюванням

Каскадна система зрідження була однією з перших систем зрідження газів. Її запропонував Р.Пікте (Швейцарія), а практично впровадили Е. Ольшевський, Х. Камерлінг-Оннес (трьохступенева схема: метилхлорид – етилен – повітря) та інші дослідники. Каскад холодильних машин організований таким чином, що випарник вищого ступеня є водночас конденсатором для нижчого. Конденсатор аміачної холодильної машини охолоджується водою. Холодоагентами машин каскаду є аміак, етилен, метан та азот (схема Кізона, 1933 р.). Зріджений азот відбирається з ванни, система підживлюється свіжим газоподібним азотом. Така система потребує меншого тиску стиснення, також кожне окреме дроселювання відбувається у вузькому діапазоні тисків, що зменшує сумарні втрати при дроселюванні. Недоліками цієї системи є насамперед складність її монтажу та експлуатації. Вона також непридатна для зрідження водню та гелію – немає такої кріорідини, що забезпечила б температуру у випарнику, достатню для їх зрідження. Зараз каскадні системи практично не застосовуються.

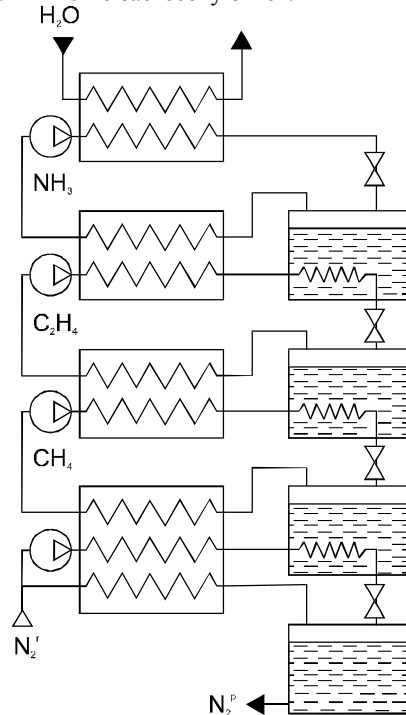


Рис. 17. Схема каскадної системи зрідження газів.

Детандерна система зрідження або система Клода (рис. 18) принципово відрізняється від описаних раніше тим, що містить детандер – пристрій для

розширення стисненого газу з виконанням зовнішньої роботи. Ентальпія газу при цьому зменшується (у ідеальному детандері процес іде ізентропійно), тому температура газу після розширення буде нижчою ніж після дроселювання у тому самому діапазоні тисків. Таким чином, вихід зрідженого газу зростає. Проте зріджувати газ у детандері не можна, бо це призведе до його руйнування. Тому стиснений газ поділяється на два потоки: дросельний та детандерний. Детандерний потік виконує роботу у детандері, охолоджується і надходить на теплообмінник, де додатково охолоджує інший, дросельний потік газу. Частка детандерного потоку від загальної витрати позначається x . Дросельний потік розширюється у дросельному вентилі, частково зріджується, причому за рахунок сильнішого охолодження потоку перед дроселюванням вихід зрідженого газу буде вищим ніж у системі з одноразовим дроселюванням. Проте збільшувати частку детандерного потоку понад певну оптимальну величину ($x = 0,6...0,7$) недоцільно, адже зменшиться витрата газу через дросель, що призведе до зниження виходу зрідженого газу.

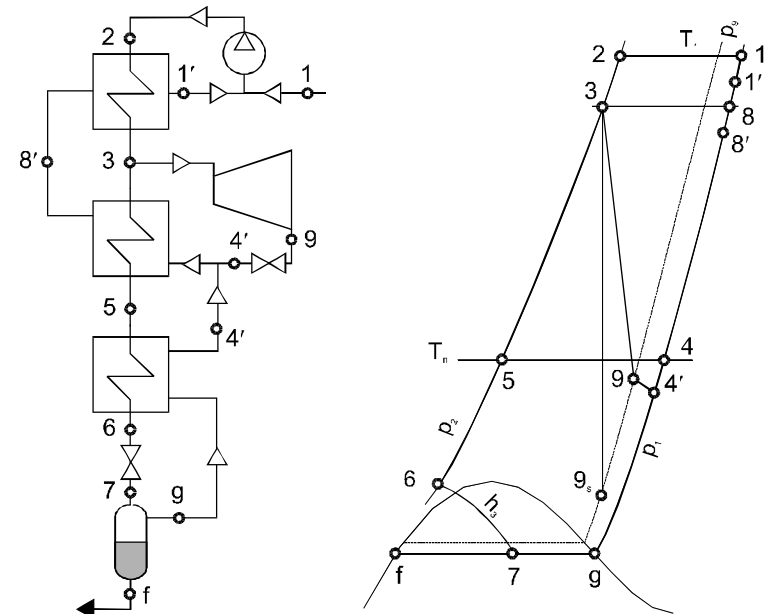


Рис. 18. Детандерна система зрідження

Існують пізніші модифікації системи Клода. Так у системі Капіці застосований турбодетандер, а перший (високотемпературний) теплообмінник – регенеративний. Це дозволило використати порівняно низький тиск стиснення $p_2 = 700$ кПа. У більш досконалій системі Коллінза, що

розглядатиметься далі, використовують не один, а декілька детандерів. Це дає змогу підвищити її ефективність і використати для зрідження водню, гелію та неону.

У системі Гейландта використовується тиск стиснення $p_2 = 20 \text{ МПа}$. Частка детандерного потоку становить 0,6, а температура перед детандером $T_3=300 \text{ К}$. У цьому разі для змащування детандера можна використовувати звичайні мастила, бо температура у детандері не опускається нижче 150К. Ще однією перевагою такої системи є можливість не використовувати перший (високотемпературний) теплообмінник, що спрощує та здешевлює систему в цілому.

Порівняння показників ефективності різних систем зрідження для різних значень ізотермічного ККД компресора η_c подано у табл. 6 [5].

Таблиця 6
Порівняння ефективності систем зрідження повітря ($p_1 = 101,3 \text{ кПа}$, $T_1 = 300\text{К}$)

Система зрідження та її параметри	Вихід зрідженого газу, у	Питома робота, l, кДж/кг	Ексергетичний ККД, η_e
Ідеальна система зрідження	1	738,9	1
Система з одноразовим дроселюванням:			
$p_2 = 20,27 \text{ МПа}$, $\eta_c=100\%$, $\epsilon=1$	0,079	5739	
$p_2 = 20,27 \text{ МПа}$, $\eta_c=70\%$, $\epsilon=0,965$	0,062	10573	
Система з попереднім охолодженням ($T_3=308 \text{ К}$)			
$p_2 = 20,27 \text{ МПа}$, $\eta_c=100\%$, $\epsilon=1$	0,158	2928	
$p_2 = 20,27 \text{ МПа}$, $\eta_c=70\%$, $\epsilon=0,965$	0,143	4691	
Система з дворазовим дроселюванням:			
$p_2 = 6,08 \text{ МПа}$, $p_3 = 20,27 \text{ МПа}$, $i = 0.8$, $\eta_c=100\%$, $\epsilon=1$	0,057	3056	
$p_2 = 6,08 \text{ МПа}$, $p_3 = 20,27 \text{ МПа}$, $i = 0.8$, $\eta_c=70\%$, $\epsilon=0.965$	0,039	6535	
те саме, з попереднім охолодженням до 228 К	—	3582	0,201
Детандерна система Клода			
$p_2 = 4,05 \text{ МПа}$, $x=0,7$, $\eta_c = \eta_s=100\%$, $\epsilon=1$	0,262	815	
$p_2 = 4,05 \text{ МПа}$, $x=0,7$, $\eta_c=70\%$, $\eta_s=80\%$, $\eta_{c.m.}=90\%$, $\epsilon=0,965$	0,198	1906	
Система Гейландта			
$p_2 = 20,27 \text{ МПа}$, $x=0,6$, $\eta_c = \eta_s=100\%$, $\epsilon=1$	0,377		0,846
$p_2 = 20,27 \text{ МПа}$, $x=0,6$, $\eta_c=70\%$, $\eta_s=80\%$, $\eta_{c.m.}=90\%$, $\epsilon=0,965$	0,305		0,402
Каскадна система	—	3526	0,221

Розглядаючи системи зрідження доцільно згадати про систему зрідження природного газу. Природний газ зріджують для зберігання та перевезень. Він являє собою суміш декількох компонентів (метан, етан, пропан та азот присутні у кількості понад 1%). Для його зрідження використовують каскадну схему на змішаному холодоагенті (рис. 19). Компоненти природного газу конденсуються при різних температурах, отже можна використовувати один компресор, розділяючи фази у сепараторах. Для газопроводів високого тиску (4-5 МПа) додатковий компресор може навіть не знадобитися.

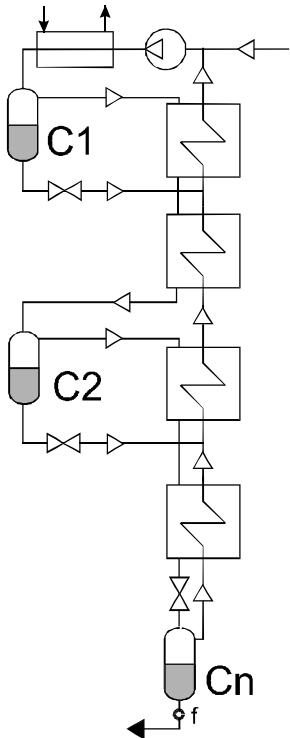


Рис. 19. Система зрідження природного газу

Природний газ надходить на компресор, стискається, після чого охолоджується і частково зріджується у охолоджувачі. Газорідинна суміш надходить на сепаратор фаз C1, рідина з якого (вона збагачена пропаном) дроселюється і змішується зі зворотнім газовим потоком, який надходить у перший трьохпоточний теплообмінник. Пара з сепаратора частково зріджується у трьохпоточному теплообміннику і надходить на другий сепаратор фаз C2. Рідина з другого сепаратора, збагачена етаном, розширюється у дроселі та

подається на другий трьохпоточний теплообмінник. Пара з другого сепаратора частково конденсується у третьому трьохпоточному теплообміннику. У цій точці потік складається в основному з метану. Він дроселюється і подається до третього трьохпоточного теплообмінника для охолодження. Основний потік газу проходить по черзі всі три теплообмінники, зріджується, дроселюється до тиску зберігання і подається у збірник зрідженого газу.

6.3. Системи зрідження водню, гелію та неону.

Для водню, гелію та неону системи без попереднього охолодження не працюють, тому що максимальна температура інверсії цих газів нижче за кімнатну. Отже під час дроселювання цих газів при кімнатній температурі буде відбуватися не охолодження, а нагрівання. Таку систему неможливо буде запустити, адже температура стисненого газу у теплообміннику буде зростати. З іншого боку ентальпія водню гелію та неону при стисканні зростає ($h_2 > h_1$). Якщо розглянути формулу для виходу зрідженого газу у системі з одноразовим дроселюванням (42) то вихід зрідженого газу у буде від'ємним. Теплоти, відібраної холодним потоком низького тиску буде недостатньо для охолодження потоку високого тиску.

Ці обставини вимагають створення специфічних систем. Для зрідження водню, гелію та неону використовують детандерні системи та системи з одноразовим дроселюванням та попереднім охолодженням. Однією з перших систем зрідження водню була система Дж. Дьюара (рис. 20), а для зрідження гелію – система Х. Камерлінг-Оннеса, що за принципом дії подібні до системи зрідження повітря Лінде з попереднім охолодженням.

Для попереднього охолодження найчастіше використовують ванни з кріорідинами. Стиснений водень (неон, гелій), проходячи через змійовик, що знаходиться у ванні, охолоджується до температури нижчої за температуру інверсії.

Для водню найефективнішим виявилось попереднє охолодження газу, що має тиск 15 МПа, зрідженим повітрям, що кипить при зниженому тиску (температура становить близько 70 К). Для гелію максимальна ефективність досягалася за тиску 3 МПа, а температура попереднього охолодження (14 К) підтримувалася за рахунок кипіння зрідженого водню (також за зниженого тиску).

Система зрідження водню з гелієвим рефрижератором являє собою систему Клода з попереднім охолодженням гелію у ванні зі зрідженим азотом. Гелій після розширення у детандері охолоджується до температури, нижчої за температуру зрідження водню і охолоджує у теплообмінному апараті водень, що конденсується. Перевагою цієї системи є порівняно низькі тиски водню 300-800 кПа

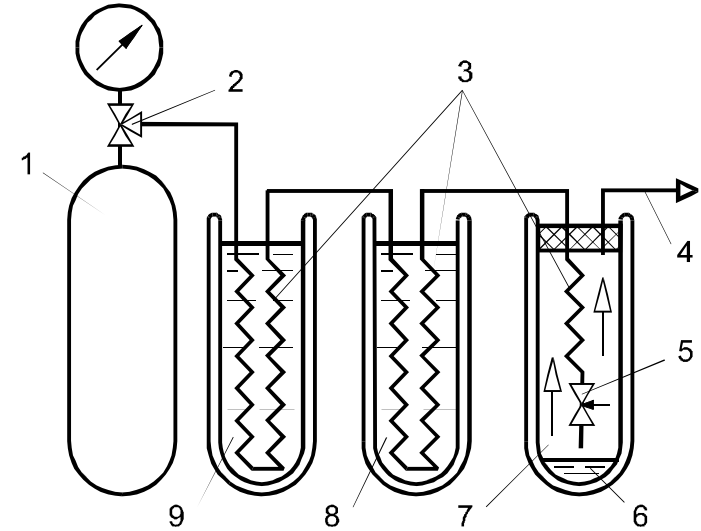


Рис. 20. Зріджувач водню Дьюара (1 – стиснений водень; 2 – вхід газоподібного водню; 3 – змійовикові теплообмінники; 4 – вихід газоподібного водню; 5 – дросель; 6 – зріджений водень; 7 – збірник зрідженого водню; 8 – зріджене повітря; 9 – вуглекислота).

Для зрідження гелію на початку XX століття використовували системи з одноразовим дроселюванням та попереднім охолодженням зрідженим воднем. Проте термодинамічні показники цих установок були невисокі через низьку температуру зрідження гелію. Нині використовують інші системи.

Система зрідження гелію Коллінза (рис 21) являє собою вдосконалену детандерну систему зрідження, у якій використовується від двох до п'яти детандерів залежно від тиску гелію після компресора. Для цієї системи наявність попереднього охолодження зрідженим азотом не обов'язкова, хоча і бажана. Попереднє охолодження дає змогу збільшити вихід зрідженого гелію майже втричі, а також вдвічі скоротити час заохолодження установок.

Зріджувач гелію Саймона (рис. 22) використовують для отримання зрідженого гелію у невеликій кількості. У ньому використовують адіабатичне розширення сильно стисненого газу. Цей метод підходить для зрідження гелію, бо завдяки низьким робочим температурам (від 11 К перед розширенням до 4 К після розширення) теплоємність посудини набагато менша порівняно з теплоємністю газу.

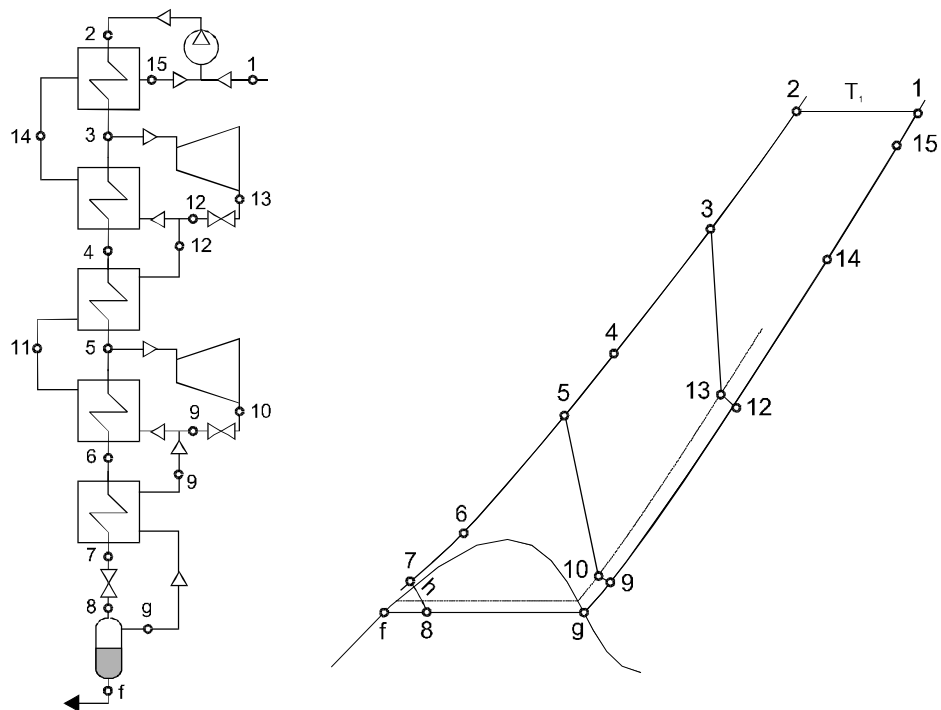


Рис. 21. Система зрідження гелію Коллінза

Процес зрідження у системі Саймона проходить таким чином:

1) газоподібний гелій стискається у товстостінній мідній посудині 1 до тиску близько 15 МПа при температурі доквілля;

2) зріджений азот подається до закритої ванни і вся система заохолоджується до 77 К (при цьому вакуумний кожух 4 заповнений газоподібним гелієм при атмосферному тиску, що слугує теплообмінним середовищем між зрідженим азотом та внутрішніми посудинами);

3) газоподібний гелій з вакуумного простору відсмоктують вакуум-насосом через трубопровід 10, через що внутрішні посудини теплоізолюються від доквілля;

4) до водневої внутрішньої посудини 3 заливають зріджений водень, охолоджуючи посудину з гелієм до 20,4 К;

5) пару водню відсмоктують вакуум-насосом через трубопровід 7, знижуючи тиск приблизно до 0,23 кПа, при цьому водень кипить при температурі, що весь час знижується доки не почнеється його затверднення, після чого водень сублімується (кількість водню підбирають таким чином, щоб він повністю сублімувався); під час кипіння та сублімації водень відводить

теплоту від посудини з гелієм 1, за рахунок чого вона охолоджується приблизно до 10 К і опиняється теплоізолюваною при цій температурі завдяки повній сублімації водню;

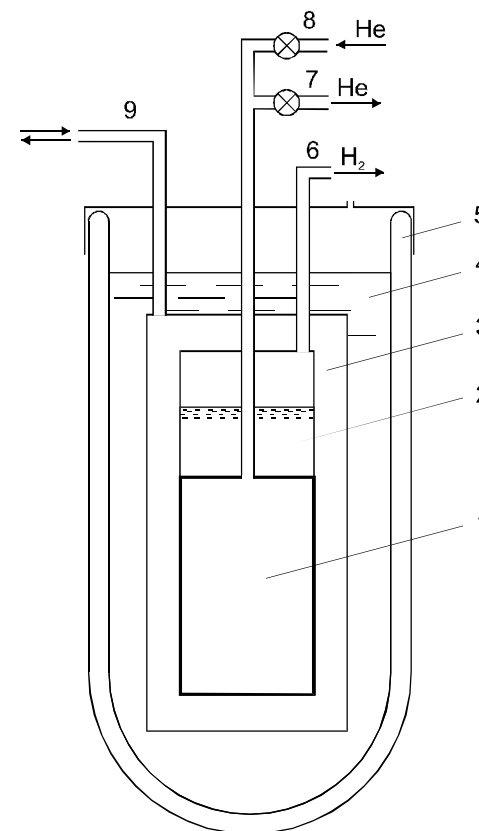


Рис. 22. Схема зріджувача гелію Саймона (1 – посудина, заповнена стисненим до 15 МПа гелієм; 2 – посудина зі зрідженим воднем; 3 – вакуумний кожух; 4 – зріджений азот; 5 – посудина Дьюара; 6, 7, 8, 9, – трубопроводи)

6) стиснений гелій у газоподібному вигляді випускається через вузьку трубку 8 в газгольдер, що перебуває при кімнатній температурі; при розширенні гелій зріджується, і рідина приблизно на 70-90% заповнює посудину 1.

6.4. Порядок розрахунку систем зрідження

6.4.1. Система зрідження з одноразовим дроселюванням

Вихідні дані: початкова температура газу T_1 , початковий тиск $p_1 = 0,1$ МПа. тиск стиснення – p_2 . теплонадходження з довкілля на 1 кг стисненого газу – $q_{\text{тн}}$. Недорекуперація – $\Delta T_{\text{нр}}$.

1. Накреслити схему установки з одноразовим дроселюванням (рис. 14, а).

2. Побудувати цикл з одноразовим дроселюванням у T - s -діаграмі для повітря (дод. 1) та визначити тиск, температуру та питому ентальпію газу у точках циклу 1, 1', 2, 3, 4, f, g (рис.14б). Значення питомих ентальпій та ентропій газу визначені в діаграмі на 1 моль речовини. Тому для перерахунку ентальпій у кДж/кг або ентропій у кДж/(кг·К) потрібно поділити одержане з діаграми значення на молярну масу газу μ (для повітря $\mu = 28,96$ г/моль). Результати зручно звести у таблицю, форма якої подана в табл. 7. Далі індекси біля позначень температур, тисків, ентальпій та ентропій означають номер точки циклу, для якої ці параметри подані.

Таблиця 7

Точка	Температура, Т, К	Тиск, р, МПа	Ентальпія, h	
			Дж / моль	кДж / кг

Температура холодного газу після теплообмінника з урахуванням недорекуперації (точка 1'):

$$T_1 = T_1 - \Delta T_{\text{нр}} \quad (44)$$

де T_1 – температура газу в точці 1; $\Delta T_{\text{нр}}$ – величина недорекуперації (недогрівання холодного газу у теплообміннику), К.

3. Вихід зрідженого газу за заданих умов (з урахуванням недорекуперації та теплонадходжень)

$$y = \frac{h_1 - h_2 - q_{\text{тн}}}{h_1 - h_f}, \quad (45)$$

де h_1 , h_2 , h_f – значення питомих ентальпій газу відповідно у точках циклу 1', 2, f, кДж/кг; $q_{\text{тн}}$ – величина теплонадходжень до системи, кДж/кг.

4. Питомі витрати теплового (g_r) та холодного (g_x) газу через теплообмінник, кг/кг стисненого газу:

$$g_r = 1/y; \quad (46)$$

$$g_x = g_r - 1. \quad (47)$$

З теплового балансу теплообмінника ентальпія теплового газу після теплообмінника (точка 3):

$$h_3 = h_2 - \frac{g_x}{g_r} (h_r - h_g), \quad (48)$$

де h_g – значення питомої ентальпії газу у точці циклу g, кДж/кг. За T - s -діаграмою за ентальпією та тиском визначається температура теплового газу після теплообмінника (T_3).

5. Мінімальна робота стиснення 1 кг газу (для ідеальної системи), кДж/кг

$$l_i = T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f), \quad (49)$$

де T_1 – температура газу у точці 1, К; s_1 , s_f – питомі ентропії газу відповідно у точках 1 та f, кДж/(кг·К); h_1 , h_f – питомі ентальпії газу відповідно у точках 1 та f, кДж/кг.

6. Робота стиснення для дійсного зріджувального циклу, кДж/кг:

$$l_0 = \frac{RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1}}{\eta_{iz} \gamma}, \quad (50)$$

де R – газова стала; для повітря $R=0,287$ Дж/(кг·К), для азоту $R=0,297$ Дж/(кг·К); p_1 , p_2 – тиски газу відповідно у точках 1 і 2, МПа; η_{iz} – ізотермічний ККД компресора; рекомендується прийняти $\eta_{iz} = 0,6$.

7. Холодильний коефіцієнт дійсного зріджувального циклу:

$$\varepsilon = \frac{(h_{1'} - h_2 - q_{\text{тн}}) \eta_{iz}}{RT_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}. \quad (51)$$

8. Холодильний коефіцієнт ідеального зріджувального циклу:

$$\varepsilon_i = \frac{h_1 - h_f}{l_i}. \quad (52)$$

9. Термодинамічний ККД установки:

$$\eta_t = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_i}. \quad (53)$$

6.4.2. Порядок розрахунку системи зрідження з одноразовим дроселюванням і попереднім охолодженням

Вихідні дані: початкова температура газу T_1 , початковий тиск $p_1 = 0,1$ МПа. тиск стиснення – p_2 . теплонадходження з довкілля на 1 кг стисненого газу – $q_{\text{тн}}$. Недорекуперація у теплообмінниках $\Delta T_{\text{нр}1}$, $\Delta T_{\text{нр}2}$. Питома холодопродуктивність системи попереднього охолодження $q_{0д}$. Температура попереднього охолодження $T_{\text{п}}$.

1. Накреслити схему установки Лінде – Хемпсона з попереднім охолодженням (рис. 15, а).

2. Побудувати цикл Лінде-Хемпсона з попереднім охолодженням у T - s -діаграмі (див. додатки 1,2) та визначити тиск, температуру та питому ентальпію газу у точках циклу (див. рис.15, б). Визначення проводиться аналогічно до п. 6.4.1. Результати занести до таблиці за формою табл. 7.

Температури холодного газу після теплообмінників (точки 1' та 5') з урахуванням недорекуперації:

$$T_1 = T_1 - \Delta T_{\text{нр1}} \quad (54)$$

$$T_5 = T_5 - \Delta T_{\text{нр2}} \quad (55)$$

де $\Delta T_{\text{нр1}}$, $\Delta T_{\text{нр2}}$ – величини недорекуперації у теплообмінниках відповідно T1 та T2.

3. Вихід зрідженого газу для системи Лінде – Хемпсона з попереднім охолодженням:

$$y = \frac{h_{5'} - h_{2'} - q_{\text{тн2}}}{h_{5'} - h_f} \quad (56)$$

де $h_{2'}$, $h_{5'}$ – значення питомих ентальпій газу відповідно у точках циклу 2' і 5', кДж/кг; $q_{\text{тн2}}$ – величина теплонадходжень до низькотемпературного теплообмінника T2, кДж/кг.

4. Теплота, що відводиться аміаком

$$q_0 = y(h_{1'} - h_{5'}) + [(h_{5'} - h_{2'}) - (h_{1'} - h_{2'}) + q_{\text{тн1}}] \quad (57)$$

де $q_{\text{тн1}}$ – величина теплонадходжень до високотемпературного теплообмінника T1, кДж/кг

5 Робота стиснення для системи з попереднім охолодженням, кДж/кг:

$$l_0 = \frac{RT_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\eta_{\text{із}} \gamma} + \frac{q_0}{q_{0\text{д}} \gamma} \quad (58)$$

де $q_{0\text{д}}$ – дійсна питома холодопродуктивність системи попереднього охолодження, кДж/кг, $\eta_{\text{із}}$ – ізотермічний ККД компресора.

6. Холодильний коефіцієнт дійсного зріджувального циклу:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_f}{l_0} \quad (59)$$

7. Термодинамічний ККД системи з попереднім охолодженням визначається за формулою (53).

Порядок розрахунку системи Клода

Вихідні дані: початкова температура газу T_1 , початковий тиск $p_1 = 0,1$ МПа. тиск стиснення – p_2 . Температура охолодження у теплообміннику T1 – T_3 . Частка детандерного потоку газу – D ; тиск після детандера p_d ; Теплонадходження з довкілля: до детандерного ступеня $q_{\text{тн,дт}}$, до дросельного ступеня $q_{\text{тн,др}}$. Недорекуперація у теплообмінниках $\Delta T_{\text{нр}}$. Коефіцієнт гідравлічних втрат $j = 1.15$. Ізотермічний ККД компресора $\eta_{\text{із}}$; ККД детандера: індикаторний η_s , механічний $\eta_{\text{мех}}$.

1. Накреслити схему установки Клода (рис. 18, а).

2. Побудувати цикл у T–s-діаграмі (дод. 2) та визначити параметри повітря в точках циклу(рис. 18б). Результати занести до таблиці за формою табл. 7.

3. Знайти параметри повітря після детандера (точка 9) та подальшого дроселювання (точка 4). Питома ентальпія повітря, кДж/кг:

$$h_4 = h_9 = h_3 - (h_3 - h_{9s})\eta_s, \quad (60)$$

де η_s – індикаторний ККД детандера; h_3 , h_9 , h_{9s} – питомі ентальпії повітря у відповідних точках циклу, кДж/кг. Процес дроселювання проходить ізоентальпійно, тому $h_9 = h_4$. Температури T_4 та T_9 знаходять за T–s-діаграмою.

4. Температура повітря після теплообмінника T2 (точка 5):

$$T_5 = T_4 = T_4 + \Delta T_{\text{нр}}. \quad (61)$$

5. Рекомендується прийняти, що теплонадходження до детандерного ступеня $q_{\text{тн,дт}}$ надходять до теплообмінника T2, а теплонадходження до дросельного ступеня $q_{\text{тн,др}}$ – до теплообмінника T3. Тоді з рівнянь теплових балансів для детандерного та дросельного ступенів можна знайти частку повітря, що подається на детандер, D та вихід зрідженого газу y :

$$D = \frac{(h_{1'} - h_f)(h_{4'} - h_5 - q_{\text{тн,др}}) - (h_{4'} - h_f)[h_{1'} - h_2 - (q_{\text{тн,др}} + q_{\text{тн,дт}})]}{(h_{1'} - h_f)(h_{4'} - h_5 - q_{\text{тн,др}}) + (h_{4'} - h_f)(h_3 - h_{4'})} \quad (62)$$

$$y = \frac{(1 - D)(h_{4'} - h_5 - q_{\text{тн,др}})}{h_{4'} - h_f} \quad (63)$$

6. З рівняння теплового балансу теплообмінника T1 знайти параметри газу в точці 8':

$$h_{8'} = h_{1'} - \frac{(h_2 - h_3)}{(1 - y)}. \quad (64)$$

Температуру $T_{8'}$ знайти за T–s-діаграмою.

7. З теплового балансу теплообмінника T3 знайти ентальпію газу у точці

6:

$$h_6 = h_5 - \frac{(1 - D - y)(h_{4'} - h_g - q_{\text{тн,др}})}{(1 - D)}. \quad (65)$$

Процес дроселювання проходить ізоентальпійно, тому $h_7 = h_6$. Значення температур T_6 та T_7 знайти за T–s-діаграмою.

8. Робота стиснення на 1 кг стисненого повітря з врахуванням витікання повітря та втрат

$$l = \frac{(1 + \delta)RT_1 \ln\left(j \frac{p_2}{p_1}\right)}{\eta_{\text{із}}} - D(h_3 - h_{4'})\eta_{\text{м}}, \quad (66)$$

де j – коефіцієнт гідравлічних втрат; δ – частка витікання повітря, $\delta = 0,05 \dots 0,07$; $\eta_{\text{м}}$ – механічний ККД детандера.

Робота стиснення на 1 кг зрідженого повітря:

$$l_0 = l/y. \quad (67)$$

9. Перевірити одержані результати, склавши загальний тепловий баланс установки:

$$h_2 + Dh_4 + q_{\text{тн}} = (1 - y)h_{1'} + Dh_3 + yh_f. \quad (68)$$

Незбіжність балансу не повинна перевищувати 1 %, у іншому разі розрахунки виконано з помилками.

10. Холодильний коефіцієнт реального циклу та термодинамічний ККД установки визначаються за формулами відповідно (59) та (53).

7. КОМПОНЕНТИ СИСТЕМ ЗРІДЖЕННЯ

7.1. Теплообмінники.

У системах зрідження теплообмінники виконують функцію регенерації теплоти. Теплота передається від потоку високого тиску до потоку низького тиску.

Для теплообмінників, що працюють у області кріогенних температур, важливо зменшити до мінімуму теплонадходження з довкілля, адже відведення теплоти з низьких температурних рівнів потребує великої кількості енергії. Тому істотною вимогою до них є компактність. З іншого боку, теплообмінники працюють на потоках високого тиску, тому мусять мати підвищену міцність. З огляду на це у невеликих лабораторних кріогенних установках набули поширення змійовикові теплообмінники.

Однотрубний теплообмінник Лінде (рис. 23, а) має найпростішу конструкцію – труба в трубі. у внутрішній трубі тече теплий газ високого тиску, між трубами – холодний газ низького тиску. Для компактності труби скручені у змійовик, який теплоізолювано. Для підвищення ефективності теплообміну на внутрішню трубу навивають дротяний джгут (рис.23, б), що працює як турбулізатор потоку низького тиску, а якщо припаяти джгут до труби – то і як оребрення.

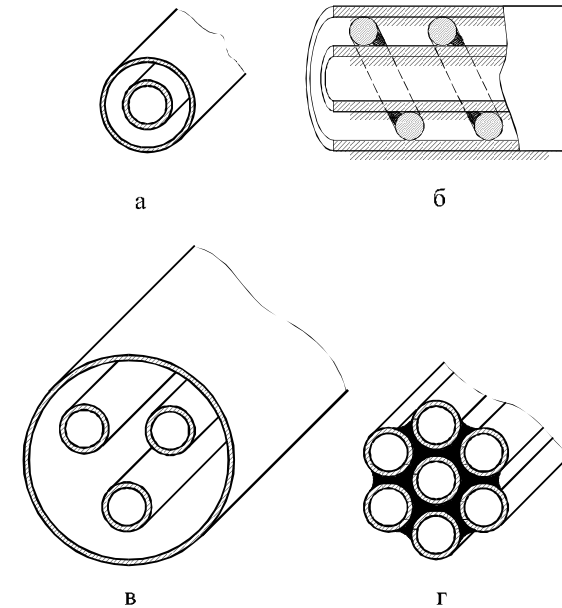


Рис. 23. Конструкції змійовиків кріогенних теплообмінників.

У багатьох кріогенних системах необхідні теплообмінники, у яких рухається три і більше потоків. Такі теплообмінники мають конструкцію з кількох труб розташованих у спільній трубко-кожусі (рис.23, в), або пучок трубок, спаяних методом занурювального паяння (рис.23, г). Для компактності подібні теплообмінники також скручують у змійовик і теплоізолюють.

Для крупних кріогенних систем використовують теплообмінник Джока-Хемпсона: кілька змійовиків малого діаметра (потік високого тиску), намотані навколо циліндра, що перебуває у обечайці. Потік низького тиску проходить у просторі між циліндром та обечайкою, а потік високого тиску – у змійовиках.

Пластинчасто-ребристі теплообмінники (рис. 24) виготовляють спаюючи пластини та гофровані (прямими або хвилястими гофрами) алюмінієві пластини. Кількість шарів пластин може бути довільною. Така конструкція дає змогу організувати протіток, поперечний та змішаний токи. Найчастіше використовують протитоківі схеми, як найефективніші з точки зору теплообміну. Ще однією перевагою пластинчасто-ребристих теплообмінників є їх компактність: у одному кубічному метрі об'єму теплообмінника можна розташувати близько 1500 м² площі теплообмінної поверхні).

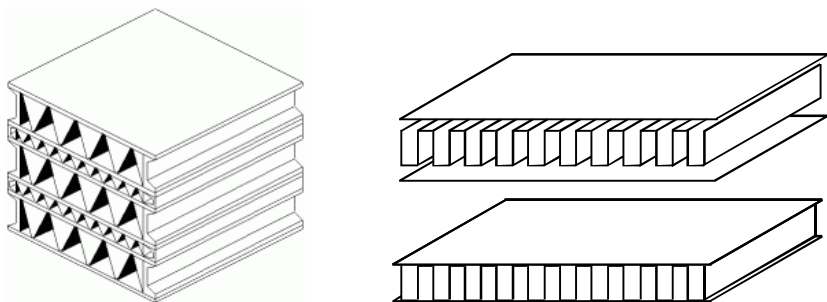


Рис. 24. Конструкції пластинчасто-ребристих теплообмінників.

Ефективність теплообмінника:

$$\epsilon = Q / Q_{\max}, \quad (69)$$

де Q , $Q_{\max}$ – відповідно дійсна і максимально можлива кількість теплоти, що передається у теплообміннику за даних умов.

Ефективність теплообмінника, як вже зазначалося у п.3.2, істотно впливає на ефективність системи в цілому. Якщо порівняти цикл 1-2-3-4-g-1 системи з ідеальним теплообмінником ($\epsilon=1$) та цикл 1'-2-3_d-4_d-g-1' системи з дійсним теплообмінником (рис. 25), то можна помітити, що:

1) ідеальний процес охолодження у теплообміннику йде від точки 2 до точки 3, а дійсний (за рахунок меншої кількості переданої теплоти) – до точки 3_d. Температура та питома ентальпія газу у точці 3_d будуть вищими ніж у точці 3;

2) питома ентальпія газу у точці 4_d, що характеризує параметри газу після дроселювання (ізоентальпійний процес) також буде вищою, отже вміст рідини у газорідинній суміші порівняно з точкою 4 (ідеальна система) буде меншим. Відповідно вихід зрідженого газу для реальної системи буде меншим ніж для ідеальної:

$$y = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \epsilon)(h_1 - h_g)}{(h_1 - h_f) - (1 - \epsilon)(h_1 - h_g)} \quad (70)$$

а питома витрата роботи на одиницю зрідженого газу більшою:

$$\Delta W/m = (1 - \epsilon)(h_1 - h_g) \quad (71)$$

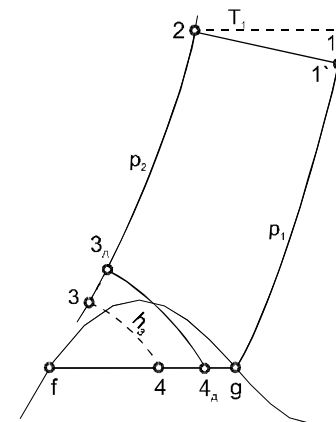


Рис. 25. Вплив ефективності теплообмінника на вихід зрідженого газу

Теплонадходження з довкілля також підвищують питому роботу зменшуючи вихід зрідженого газу:

$$y = \frac{h_1 - h_2 - Q/m}{h_1 - h_f} \quad (72)$$

де Q – питомі теплонадходження з довкілля, Вт; m – продуктивність системи за стисненим газом, кг/с.

Особливо значний вплив теплонадходжень спостерігається у малих установках, де площі контакту з довкіллям на одиницю маси газу порівняно великі.

7.2. Компресори та детандери.

Компресори кріогенних систем мають ряд особливостей:

- 1) високий ступінь стиснення газу (може перевищувати 200);
- 2) високі кінцеві тиски стиснення (15...20 МПа)
- 3) потреба у високих об'ємних витратах на першому ступені
- 4) температура початку стиснення близька до кімнатної

Виходячи з цих особливостей використовують багатоступеневі компресори з водяним чи повітряним охолодженням. На першому ступені доцільно використовувати турбокомпресори, що можуть забезпечити високі об'єми витрати, проте не дають високих ступенів стиснення. На подальших ступенях, коли тиск газу зростає, а об'єм відповідно зменшується, використовують поршневі компресори. Для газів, що мають високу текучість (наприклад гелій), а отже підвищені вимоги щодо щільності, поршневі компресори використовують і на першому ступені.

Для розширення газу використовують поршневі детандери та турбодетандери. Особливістю роботи кріогенних детандерів є те, що у кінці розширення газ має температуру 50...100 К, що робить неможливим використання традиційних мастил. У перших детандерах, розроблених Джорджем Клодом, були спроби змащувати пару тертя зрідженим повітрям, проте це значно підвищувало теплообмін між довкіллям та газом, тому від цієї конструкції відмовились, і у подальших конструкціях Клод використовував шкіряні манжети без змащування.

Гейландту вдалося значно підвищити ефективність поршневого детандера за рахунок використання тонкостінної проставки (рис. 26). Циліндр детандера був подовжений, а над поршнем 3 поміщувалася тонкостінна проставка 1, що не торкалася стінок циліндра. Це дало змогу, по-перше, забезпечити роботу ущільнювального поршня 3 при кімнатній температурі (а отже використати традиційні мастила), а по-друге – завдяки проставці забезпечити відведення енергії тертя поршнів 2 і 3 назовні, а не до газу, що розширюється.

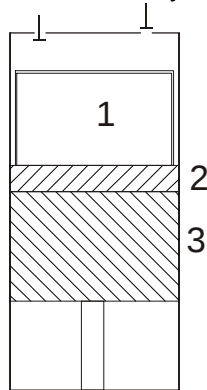


Рис. 26. Детандер Гейландта: 1 – тонкостінна проставка з низькою теплопровідністю, 2 – проміжний поршень 3 – ущільнювальний поршень.

Турбодетандери являють собою турбіни з активними та реактивними ступенями, об'єднані з модулем використання роботи детандера – гальмівним модулем. У якості гальмівного модуля використовують відцентровий компресор (для стиснення газу) або електрогенератор (для вироблення

електроенергії). Для досягнення потрібної частоти обертання генератора використовують редуктор. Діаметр робочих коліс турбодетандерів, що використовують у кріогенних установках становить від 36 мм до 525 мм.

У ідеальних детандерах розширення газу відбувається ізентропійно. Питома робота ізентропійного розширення газу:

$$\frac{W}{m} = \frac{kRT_1}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (73)$$

У ідеальному компресорі газ стискається ізотермічно. Питома робота ізотермічного стиснення газу:

$$\frac{W}{m} = RT_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (74)$$

Реальні машини порівняно з ідеальними мають ряд додаткових втрат:

Втрати у поршневих машинах:

1. *Втрати у вхідному та вихідному клапанах.* Втрати тиску на подолання гідравлічного опору каналу клапана. Наслідок – збільшення потрібного ступеня стиснення у компресорі або зменшення робочої різниці тисків у детандері. Розширення газу у каналі клапана йде не ізентропійно а ізентальпійно, що підвищує кінцеву температуру та ентальпію газу після розширення у детандері, а отже зменшує корисну роботу детандера;

2. *Неповне розширення.* Клапан відкривається до досягнення поршнем мертвої точки (для детандерів – це один із способів регулювання, бо на останніх 10% ходу поршня роботи отримується мало, а втрати на тертя та теплонадходження – найбільші).

3. *Теплонадходження до системи.* Негативний вплив теплонадходжень на ефективність кріогенної системи вже розглядався у п. 7.1. Теплонадходження підвищують кінцеву ентальпію газу після розширення у детандері.

4. *Тертя поршня.* Частина енергії, що докладається у компресорі або виділяється у детандері, витрачається на подолання тертя у парі “поршень-циліндр”. Це збільшує потрібну роботу компресора та зменшує корисну роботу детандера.

Втрати у турбомашинах:

1. *Вхідні втрати тиску.* Втрати тиску газу у вхідному каналі турбодетандера зменшують корисну роботу детандера (див. вище).

2. *Тертя у дисках.* Частина енергії витрачається на подолання тертя на валу турбіни.

3. *Втрати у робочому колесі.* Виникають внаслідок руху газу у міжлопаткових каналах турбіни, залежать від кута нахилу лопаток, швидкості потоку, типу турбіни;

4. *Вихідні втрати.* Потік газу, що виходить з турбіни має певну ненульову швидкість, а отже і кінетичну енергію, що розсіюється, перетворюючись на теплову, при гальмуванні потоку.

Всі ці втрати враховують за допомогою коефіцієнтів корисної дії (ККД), що визначають експериментальним шляхом.

1. Ізотермічний ККД компресора – відношення роботи ідеального (ізотермічного) компресора до роботи реального компресора, визначеної з індикаторної діаграми

$$\eta_T = \left(\frac{W}{m} \right)_{T=\text{const}} / \left(\frac{W}{m} \right)_{\text{indicat}} \quad (75)$$

Для поршневих компресорів і для турбокомпресорів $\eta_T = 0,85...0,90$.

2. Адіабатний ККД детандера – відношення різниць ентальпій газу до і після розширення у реальному та ідеальному (ізоентропійному) детандерах:

$$\eta_s = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_2)_{s=\text{const}}} \quad (76)$$

Для поршневих детандерів $\eta_s = 0,75...0,85$, для турбодетандерів $\eta_s = 0,7...0,85$.

3. Механічний ККД компресора – відношення роботи компресора за індикаторною діаграмою до дійсної роботи компресора:

$$\eta_{m,k} = \left(\frac{W}{m} \right)_{\text{indicat}} / \left(\frac{W}{m} \right) \quad (77)$$

4. Механічний ККД детандера:

$$\eta_{m,d} = \left(\frac{W}{m} \right)_{\text{indicat}} / (h_1 - h_2) \quad (78)$$

5. Повний ККД компресора

$$\eta_0 = \eta_T \eta_{m,k} \quad (79)$$

6. Повний ККД детандера

$$\eta_0 = \eta_s \eta_{m,d} \quad (80)$$

Ефективність як компресора, так і детандера значно впливає на вихід зрідженого газу. Тому постійно ведуться розробки досконаліших конструкцій компресорів та детандерів, що мали б якомога вищі ККД.

8. СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ КРІОГЕННИХ РІДИН

8.1. Фізичні засади процесів розділення

Завданням системи розділення є виділення із суміші всіх її компонентів у максимально чистому вигляді. Система очищення передбачає втрату окремих компонентів. Наприклад, спочатку повітря очищують від водяної пари та вуглекислого газу (зберігати ці гази немає потреби, бо їх можна у більшій кількості отримати простішими способами), а потім розділяють на азот, кисень та аргон.

Рушійною силою процесів розділення є різниця концентрацій (парціальних тисків) компонентів.

Позаяк повітря є сумішшю газів (див. табл. 5), зріджене повітря є сумішшю кріорідин. Незважаючи на велику кількість компонентів повітря для зручності розрахунків у кріогенній техніці його найчастіше розглядають як бінарну (подвійну) суміш:

$O_2 - 20,9\%$

$(N_2 + Ar) - 79,1\%$.

У окремих випадках (зокрема для розрахунку вилучення аргону) повітря вважають потрібною сумішшю:

$O_2 - 20,95\%$

$N_2 - 78,1\%$,

$Ar - 0,95\%$.

Кожен з компонентів повітря має певну температуру кипіння. Для бінарної суміші прийнято називати *висококиплячим* компонент, що кипить при вищій температурі, а *низькокиплячим* – той, що кипить при нижчій. Молярну частку низькокиплячого компонента у рідкій фазі суміші позначають x , а у паровій – y .

Суміші речовин можуть бути зеотропними (неазеотропними), коли кожен компонент википає окремо, або азеотропними (поводитися як чиста речовина). Азеотропні суміші не можуть бути розділені шляхом кипіння, але кріорідини їх майже не утворюють.

Для аналізу процесів розділення зеотропних сумішей використовують діаграми сумішей $T-x$ (температура – мольна частка) та $h-x$ (ентальпія – мольна частка). Ці діаграми для азотно-кисневої суміші наведені у додатку 3.

Розглянемо поведінку азотно-кисневої суміші за зниження температури (рис.27). Якщо почати охолодження з газової фази (точка 1) то температура газової суміші знижуватиметься за незмінного складу ($x = \text{const}$) до досягнення верхньої лінії фазової рівноваги (лінія конденсації), що відповідає температурі конденсації висококиплячого компонента. Якщо температура суміші однакова, то почне конденсуватися висококиплячий компонент. Рідина матиме склад, що відповідає точці 2f, а склад газу на початку конденсації буде близьким до початкової суміші (точка 2g). Зі зниженням температури склад як рідини, так і пари буде змінюватися (відповідно точки 3f і 3g) – у них зростатиме вміст низькокиплячого компонента. Коли вся суміш сконденсується, то рідина

матиме такий самий склад, як і початкова суміш (точка 4f) а остання порція пари – склад, що відповідає точці 4g. Процес конденсації проходитиме при змінній температурі на відміну від чистої речовини. Далі рідина охолоджуватиметься до кінцевої температури (точка 5) без зміни складу.

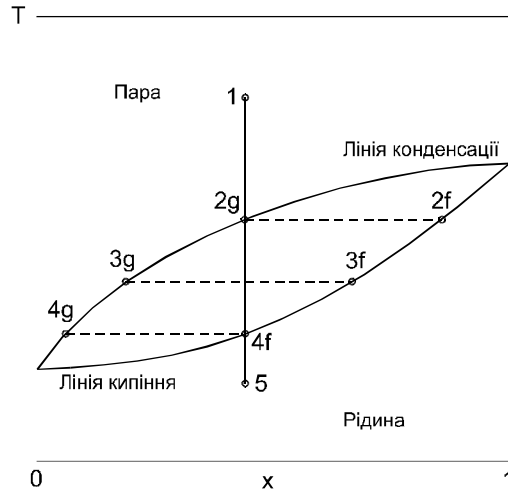


Рис. 27 Конденсація зеотропної бінарної суміші

Якщо розглянути точки 3f і 3g то можна помітити, що у них парова та рідинна фази мають значно відмінний склад: пара збагачена низькокиплячим компонентом, а рідина – висококиплячим. Якщо розділити пару і рідину та повторити процес фазового переходу (кипіння суміші відбуватиметься у зворотному порядку) то отримуємо ще чистіші компоненти суміші. На багаторазовому кипінні і конденсації ґрунтується ректифікація – основний метод розділення сумішей кріорідин.

8.2. Ідеальна система розділення

Термодинамічно ідеальна система є зразком для оцінювання інших систем. Розглянемо бінарну суміш компонентів А і В поміщену у циліндр з двома поршнями, один з яких проникний лише для компонента А, а другий – лише для компонента В (рис. 28).

Якщо зближувати поршні, при цьому відводячи теплоту стиснення, то об'єм суміші зменшуватиметься, тиск її зростатиме, відповідно парціальні тиски компонентів А і В також зростатимуть. За рахунок різниці парціальних тисків компонент А проходитиме крізь лівий поршень, а компонент В – крізь правий. Коли поршні остаточно зближаться у лівій частині циліндра знаходитиметься лише компонент А, а у правій – лише компонент В.

Якщо розглянути окремо процеси з компонентами, то можна вважати, що лівий поршень ізотермічно стискає від парціального тиску компонента до повного тиску суміші лише газ В, а правий – лише газ А.

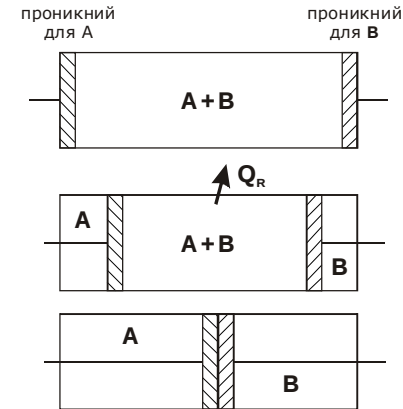


Рис. 28. Ідеальна система розділення газової суміші

Отже сумарна робота розділення двох компонентів для ідеальної системи:

$$l = T_{\text{сум}} \left[\frac{m_A}{m_{\text{сум}}} R_A \ln \left(\frac{p_{\text{сум}}}{p_{1A}} \right) + \frac{m_B}{m_{\text{сум}}} R_B \ln \left(\frac{p_{\text{сум}}}{p_{1B}} \right) \right] \quad (81)$$

або для j компонентів:

$$l = RT_{\text{сум}} \sum_{i=1}^j x_i \ln \left(\frac{1}{x_i} \right) \quad (82)$$

8.3. Системи розділення повітря.

Одноколонна система Лінде (рис. 29) – найпростіша з ректифікаційних систем розділення. Основним її елементом є ректифікаційна колона з тарілками. Повітря стискається до 3...6 МПа для отримання переважно газоподібного кисню або до 20 МПа для отримання переважно зрідженого кисню, очищується у адсорбері від вуглекислого газу та водяної пари (якщо цього не зробити, то ці речовини кристалізуються і заб'ють трубопроводи та арматуру системи). Теплий потік стисненого повітря охолоджується у трьохпоточному теплообміннику потоками кисню та азоту, потім додатково охолоджується перед дроселюванням зрідженим киснем у кубі ректифікаційної колони, дроселюється, зріджується і подається на верхню тарілку колони.

Тарілки колони мають невеликі отвори для проходження пари і бордюри для того, щоб на тарілці постійно перебував шар рідини (флегми). Пара підходить до тарілки знизу і рівномірно проходить крізь усі отвори, утворюючи бульбашки (рис. 30, а). При проходженні парової бульбашки крізь рідину у ній

відбувається ряд тепломасообмінних процесів (рис. 30, б). Слід нагадати, що у повітрі висококиплячим компонентом є кисень, а низькокиплячим – азот. Пара з бульбашки частково конденсується, причому насамперед конденсується і переходить до рідини кисень. З іншого боку, до рідини передається теплота конденсації пари, тому з рідини випаровується насамперед азот, переходячи до бульбашки.

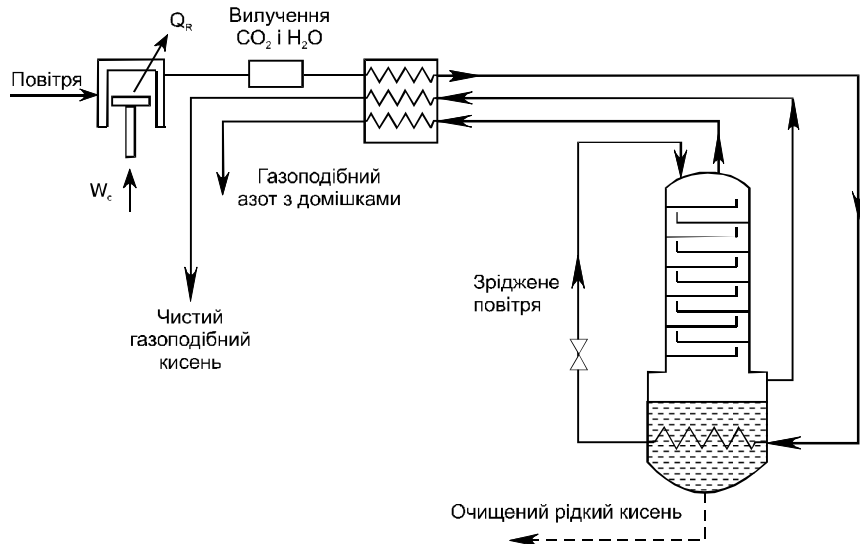


Рис.29 Одноколонна система розділення повітря Лінде.

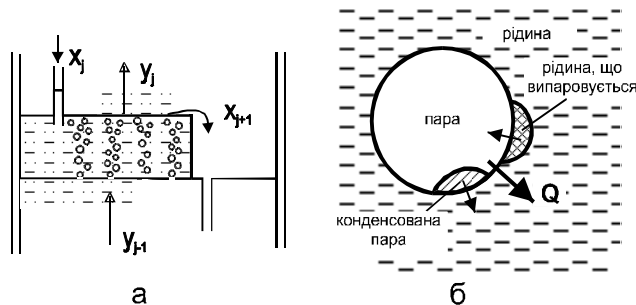


Рис. 30 Тарілка роздільної колонни: а – загальний вигляд; б – тепломасообмінні процеси у паровій бульбашці.

Дійшовши до межі шару рідини парова бульбашка, що має вже більший вміст азоту, виходить у простір колонни і надходить на наступну тарілку, розташовану вище, де вміст азоту у рідині вищий.

Рідина з тарілки, збагачившись киснем та збіднившись азотом, переливається через бордюр на нижчу тарілку, де проходить аналогічний процес. Рідина збирається у нижній частині колонни – кубі, де крізь неї проходить змійовик з теплим повітрям. Повітря охолоджується, а кубова рідина частково випаровується. Пара, що утворюється, міститиме як кисень, так і незначні залишки азоту. Ця пара і надходить на тарілки колонни. За рахунок випаровування азоту з кубової рідини вона міститиме більше кисню. Далі ця рідина відбирається на збірник зрідженого кисню. Для отримання газоподібного кисню достатньо випарувати зріджений кисень (наприклад за рахунок теплונатходжень з довкілля. Чим більша кількість тарілок у колоні тим вищою буде чистота компонентів: азоту у парі та кисню у рідині.

Під час розділення повітря з верхньої точки колонни відбирають газоподібний азот з невеликими домішками кисню та інших газів, а з нижньої частини – зріджений та газоподібний кисень.

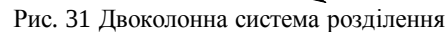
Перевагою одноколонної системи є її порівняна простота. Але на такій установці весь азот і деяка частина кисню втрачається з недоочищеним відхідним газом, що містить 6...10% кисню та 90...94% азоту. Для продукційного азоту це недостатня чистота, до того ж, зріджений азот на одноколонній установці отримати неможливо. Також економічно недоцільно втрачати кисень з відхідним газом.

Двоколонна система розділення (рис.31) позбавлена цих недоліків. Вона складається з двох колон, встановлених одна на одну. У верхній колоні підтримується тиск близько 100 кПа, а у нижній – 500...600 кПа. Між колонами встановлено теплообмінник, що виконує функції випарника і конденсатора.

Принцип роботи двоклонної установки подібний до одноклонної. Стиснене та очищене від водяної пари та вуглекислого газу повітря охолоджується у змійовику кубовою рідиною нижньої колонни, дроселується, частково зріджується та подається до середньої частини нижньої колонни. Рідина крізь тарілки стікає в куб, збагачуючись киснем, а газ, збагачуючись азотом йде нагору, де у верхній частині нижньої колонни практично чистий азот конденсується за рахунок кипіння кисню у кубі верхньої колонни. Кількість цього азоту досить велика, тому частина азоту подається до верхньої колонни для забезпечення її флегмою, частина відбирається, як продукційний азот, а решта стікає по тарілках нижньої колонни.

Збагачене киснем повітря відбирається з куба нижньої колонни, дроселується та подається до середньої частини верхньої колонни. Пара, що утворилася внаслідок дроселування піднімається нагору крізь тарілки верхньої колонни, збагачуючись азотом, а рідина стікає вниз по тарілках, збагачуючись киснем. З випарника верхньої колонни вилучається практично чистий рідкий

Дещо спрощеною модифікацією двоколонної системи є одноколонна система для добування зрідженого азоту. У ній відсутня верхня частина верхньої колони з тарілками, проте випарник-конденсатор наявний, а у просторі над ним підтримується нижчий тиск ніж у колоні. Така система простіша і дешевша і дає змогу отримати зріджений азот, проте чистота продуктів буде нижчою ніж у двоколонній системі.

[illegible]

61

Повітря фільтрується та стискається приблизно до 560 кПа у турбокомпресорі 1 (як вже зазначалося, турбокомпресори ефективно працюють на великих витратах повітря і порівняно малих ступенях стиснення). Приблизно 96% від загальної витрати стисненого повітря надходить на дві пари регенераторів 7, де повітря охолоджується вихідними потоками чистих азоту та кисню. Протягом першого напівперіода роботи регенератора повітря охолоджується, з нього видаляються водяна пара та вуглекислий газ. У другому напівперіоді (перемикаються потрібні клапани) поки повітря охолоджується у іншій парі регенераторів, водяна пара та вуглекислий газ випаровуються і видаляються з системи. Охолоджене повітря подається до нижньої колони. Близько 4% загальної витрати повітря надходить на скруббер 2, де з нього видаляється вуглекислий газ. Потім ця частина повітря стискається до 12,7 МПа у компресорі 3 і проходить серію теплообмінників: попередній охолоджувач 4, аміачний охолоджувач 5 та два теплообмінники з газоподібним азотом 6 і 11. Охолоджене повітря розширюється у дросельному вентилі 13 і разом з основною частиною повітря подається до нижньої частини нижньої колони (робочий тиск у цій колоні становить 500 кПа). З верхньої частини нижньої колони відбирається практично чистий рідкий азот, переохолоджується у теплообміннику 9 для запобігання скипанню рідини під час дроселювання, дроселюється у вентилі 8 приблизно до 123 кПа і подається у верхню частину верхньої колони. Практично чистий холодний газоподібний азот відбирається з вершини верхньої колони, проходить через теплообмінники 9, 6, 4, охолоджуючи рідину, що подається до верхньої колони, та стиснене повітря, що надходить до нижньої колони. Практично чистий холодний газоподібний азот, що відбирається з вершини нижньої колони, проходить через теплообмінник 11, охолоджуючи повітря перед нижньою колоною, розширюється у детандері 10 приблизно до атмосферного тиску (температура газу при цьому знижується) та через регенератори відводиться на зберігання. Газоподібний кисень, що відбирається з нижньої частини верхньої колони, проходить через регенератори та відводиться на зберігання.

Система розділення з вилученням аргону (рис. 33). Аргон є третьою за вмістом складовою повітря. Це – інертний газ, що використовується для створення нейтральних середовищ (зокрема під час електрозварювання). Його температура кипіння (87 К) перебуває між температурами кипіння кисню і азоту. Аргон розчиняється і у кисні, і у азоті, але має меншу густину ніж кисень і азот. Він є небажаною домішкою, бо зменшує чистоту продукційних азоту та кисню. У двоколонній системі аргон збирається у тій частині верхньої колони, де вища концентрація кисню і нижча концентрація азоту (приблизно посередині). Тому відбирати аргонвмісну суміш доцільно з середини верхньої колони.

У суміші, що йде на аргонвіддільну колону міститься близько 12% аргону, а решта – в основному кисень. У аргонвіддільній колоні проходить процес ректифікації суміші, у якому кубовою рідиною є кисень, а кубовим

газом – аргон з домішками кисню. Сирий газоподібний аргон відбирають з вершини колони.

Очищення сирого аргону від домішок кисню здійснюють двома способами:

1) *каталітичне окислення*: до сирого аргону додають водень, стискають суміш до 500 кПа та подають у камеру каталітичного згорання, де у присутності каталізатора утворюється водяна пара; далі водяну пару конденсують, її залишки сорбують оксидом алюмінію, а водень і азот відділяють у ректифікаційній колоні. Чистота рідкого аргону, що відбирають з колони становить до 40 проміле.

2) *адсорбція кисню на цеоліті*.

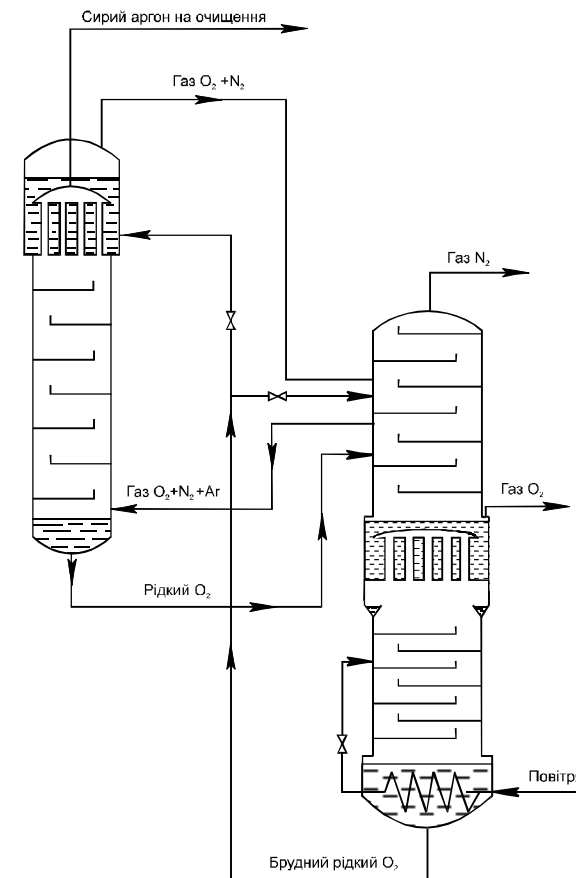


Рис.33. Система розділення повітря з вилученням аргону

Системи розділення повітря з вилученням інертних газів (рис. 34). На потужних установках розділення повітря у вигляді побічних продуктів отримують газові суміші, збагачені інертними газами: ксеноном (Xe), криптоном (Kr), аргоном (Ar), неоном (Ne), гелієм (He). З цих сумішей, що називають первинним концентратом, потім отримують чисті інертні гази. На рис. 37 наведена спрощена принципова схема вузла ректифікації із зазначенням місць відбирання первинних концентратів. Неоон і гелій (компоненти з найнижчою температурою конденсації) не конденсуються у колоні 5 (за винятком незначного розчинення у зрідженому азоті) і накопичуються у паровій суміші у верхній частині конденсатора нижньої колоні 5 при тиску близько 0,56 МПа. Ця суміш (Г), що містить газоподібні N_2 , He (0,8%), Ne (2%), відводиться у дефлегматор 2, де охолоджується зрідженим азотом D_a з температурою близько 80 К. При цьому частина азоту з суміші конденсується, а вміст He та Ne зростає приблизно до 50%.

Криптон та ксенон з найвищою температурою конденсації накопичуються у кисні. Їх вміст у кисні у 5 разів вищий ніж у повітрі. Цей кисень з колони 1 відводиться на колону 4 у вигляді рідини П або пари (тоді колону 4 виготовляють двосекційною). З нижньої частини колони 4 відводиться на випарник збагачена рідина, з якої на випарнику отримують первинний криптоновий концентрат, що містить 0,1...0,2% (Kr + Xe). Кисень з випарника повертається на колону 4.

Аргон накопичується у середній частині колони 1, бо його температура кипіння перебуває між температурами кипіння кисню та азоту. Властивості потрібної системи $O_2 + N_2 + Ar$ такі, що на деяких тарілках колони 1 його вміст значно перевищує вміст у повітрі. Найбільший вміст аргону, як правило, спостерігається на тарілках, що лежать нижче точки введення кубової рідини. З колони 1 аргонна фракція Ф у паровій фазі відводиться для концентрування у колону 3, звідки отримують сирий аргон ($Ar - 80...95\%$, $N_2 - 10...3\%$, $O_2 -$ решта). Точка виведення аргонної фракції лежить дещо нижче перерізу з максимальним вмістом аргону. Це дає змогу зменшити у ній вміст азоту. Флегма, необхідна для роботи аргонної колони утворюється з пари у конденсаторі аргонної колони 3, теплота конденсації передається кубовій рідині R, що кипить у міжтрубному просторі конденсатора флегми. Флегма тече по тарілках вниз назустріч парі, а потім відводиться у колону 1. Вилучення інертних газів дає змогу отримати азот та кисень високої чистоти у колоні 1.

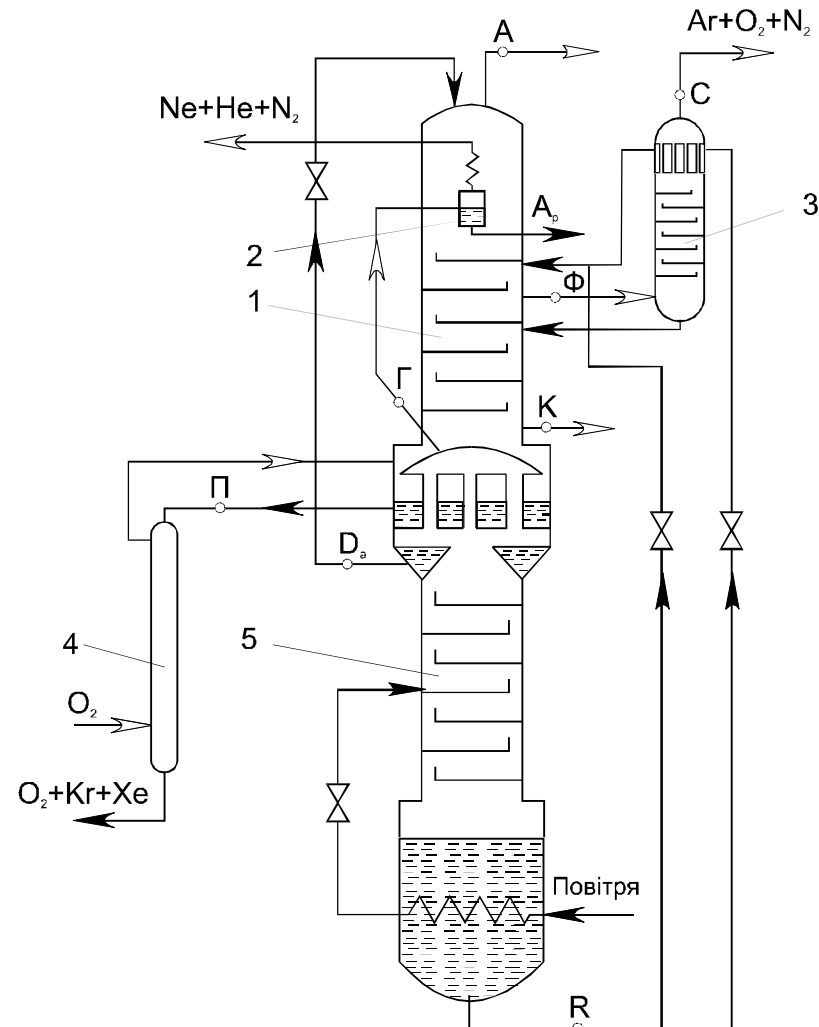


Рис. 34. Спрощена схема вузла ректифікації з відбиранням сумішей, збагачених інертними газами

8.4. Інші системи розділення газів

Серед інших систем розділення слід виділити системи вилучення водню з коксового газу. Цей газ утворюється під час роботи коксових батарей. Типовий склад коксового газу наведений у табл. 8

Таблиця 8.

Типовий склад коксового газу		
Складова	Вміст за об'ємом, %	Нормальна температура кипіння К
Водень	46,5	20,3
Метан	26,2	111,7
Азот	13,1	77,4
Окис вуглецю	6,3	81,6
Двоокис вуглецю	3,2	—*
Кисень	1,0	90,2
Етан	1,0	184,5
Важкі вуглеводні	2,6	—
Решта	0,1	—

* за атмосферного тиску двоокис вуглецю сублімується при 194,7 К

Водень вилучають з коксового газу шляхом кріооброблення. Температура кипіння водню значно нижча ніж інших компонентів, тому достатньо простої системи “випаровування-конденсація”.

Система Лінде-Бронна (рис. 35) містить аміачний рефрижератор, у якому газ охолоджують до -45°C (228К). Охолоджений газ стискають і послідовно охолоджують в теплообмінниках 1 до 173 К (при цьому конденсується пропілен), 2 до 132К (при цьому конденсуються етилен, етан, частково метан), 3 до 93К (при цьому конденсується більшість метану). Сконденсовані гази відділяють від основного потоку. Далі газ проходить скруббер CO , що зверху зрошується рідким азотом від зовнішнього джерела. З верхньої частини скрубера відбирають газ, що містить 75% водню та 25 азоту, який відправляють крізь теплообмінники 3, 2, 1 на збірник. Також через теплообмінники проходить сконденсований і здросельований метан. Якщо треба отримати чистий водень – то отриману суміш направляють на конденсатор-випарник, де з неї конденсується азот за рахунок кипіння азоту при нижчому тиску.

Система “Л’єр Лікід” відрізняється від попередньої наявністю детандера, через який проходить газоподібний водень. Перевагою такого рішення є відсутність потреби у зрідженому азоті для охолодження, а отже вища економічність. З іншого боку детандер потребує обслуговування, його наявність ускладнює систему.

Серед інших систем розділення газів слід відзначити системи виділення дейтерію з водню (використовується у термоядерній енергетиці) та гелію з природного газу (один з основних способів отримання гелію).

8.5. Очищення газів.

Очищення охолодженням. Використовують у випадках, коли основний газ та гази-домішки мають значно відмінні температури конденсації (водяна

пара – повітря). Під час охолодження гази-домішки конденсуються і легко відділяються від основного потоку газу.

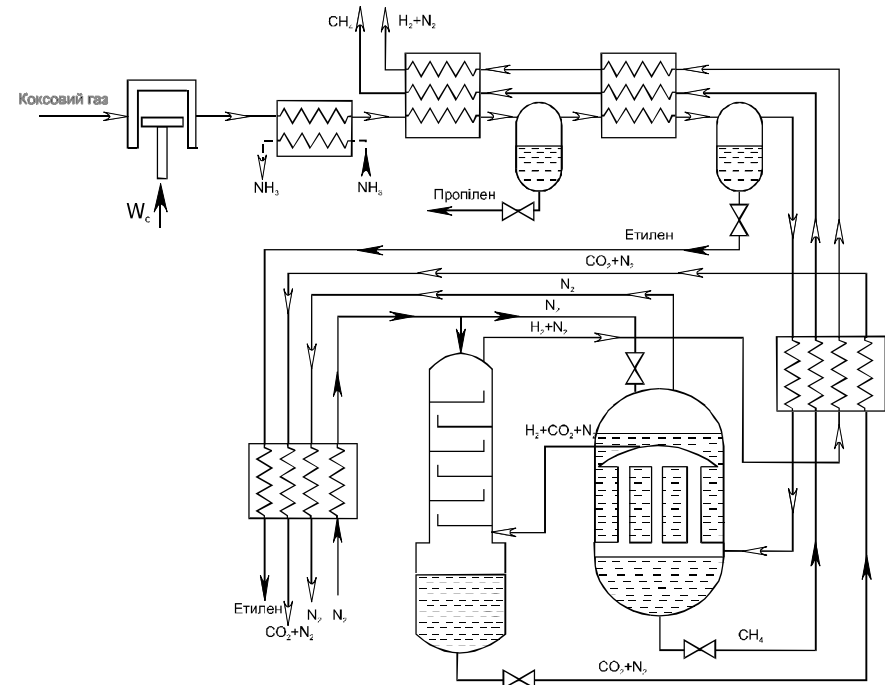


Рис. 35. Система виділення водню з коксового газу Лінде-Бронна

Фізична адсорбція. Зумовлена взаємним притяганням молекул адсорбенту (поглинає) і адсорбату (поглинається). Обернений процес до адсорбції – десорбція. Як правило під час адсорбції виділяється теплота (екзотермічний процес). Адсорбція відбувається довільно на поверхні розділу. Для покращення адсорбуючих властивостей спеціально створюють адсорбенти з розвиненою поверхнею (сульфовугілля, цеоліт). Адсорбенти поділяють на поруваті, як то силікагелі, сульфовугілля, цеоліти (гідратовані алюмосилікати) і непоруваті (метали, графітована сажа, скло).

У кріогенній техніці адсорбцію застосовують для осушення повітря. Встановлюють блок з двох апаратів із сорбентом, один з яких працює у режимі сорбції, а другий – регенерації (десорбції газів при нагріванні сорбенту нагрітим азотом). При цьому поглинається волога, CO_2 , ацетилен.

Також використовують низькотемпературне адсорбційне очищення газів: аргону від кисню, гелію від водню і азоту. Таке очищення дає змогу отримати гази зі вмістом домішок не більше як 10-5-10-6 об%.

Сорбційне розділення газів застосовується для азеотропних сумішей (етилен+етан, етилен+CO₂ та інших). З неонов-гелієвої суміші: при 77K неон сорбується у 20 разів більше ніж гелій, тому з'являється можливість виділити чистий неон шляхом відкачування газу чи нагрівання адсорбенту. Для малих продуктивностей адсорбція конкурує з ректифікацією у розділенні повітря на азот та кисень.

Для зберігання газів у малих обсягах використовують капсулювання. Якщо нагріти цеоліт, то збільшиться діаметр “вхідного вікна” пор, тому якщо підвищити тиск газу, то молекули газу зможуть проникати у порожнини цеоліту. Якщо після цього цеоліт охолодити, то молекули газу виявляться замкненими у порах. Для виділення газу з цеоліту його достатньо нагріти.

9. ЗБЕРІГАННЯ І ТРАНСПОРТУВАННЯ КРІОРІДИН

Як уже зазначалося, у кріотехнологіях найчастіше використовують кріорідини. Після одержання їх потрібно зберігати та транспортувати до споживача. Для цього використовують посудини (кріорезервуари) місткістю від 1 л (для лабораторних досліджень) до кількох сотень кубічних метрів (у ракетно-космічних комплексах).

9.1. Посудини для зберігання кріорідин.

Найпростішим кріорезервуаром є одностінна посудина з теплоізоляцією (пінопласт, скловолокно тощо). Але кріорідина у такій посудині повністю випає протягом короткого часу (від кількох хвилин до кількох годин).

Зараз частіше використовують посудини Дьюара (рис 36), винайдені Джеймсом Дьюаром у 1892 р. Втрати кріорідини від випаровування у таких посудинах становлять до 0,1% за добу.

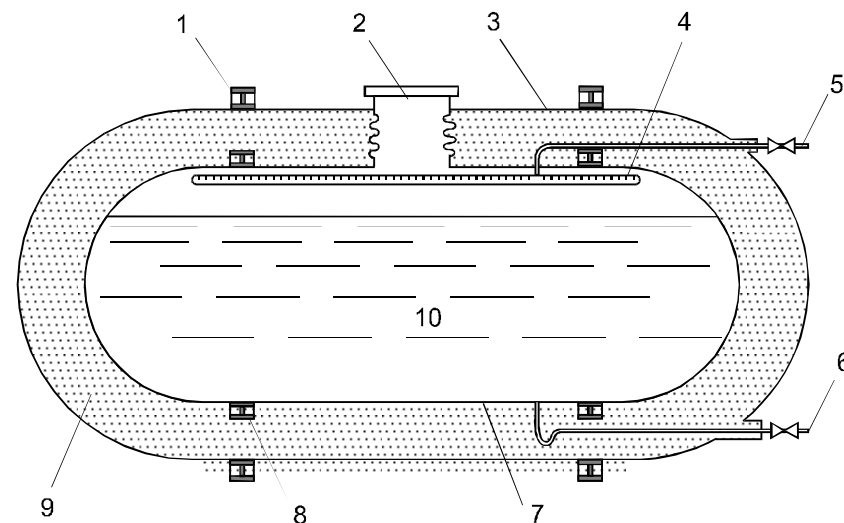


Рис 36. Кріорезервуар Дьюара (1 – кільце жорсткості зовнішньої посудини, головне опорне кільце; 2 – оглядовий лаз; 3 – зовнішня посудина; 4 – газовий колектор; 5 – газоскидна лінія; 6 – лінія заповнення та спорожнення; 7 – внутрішня посудина; 8 – кільце жорсткості внутрішньої посудини; 9 – вакуумована теплоізоляція; 10 – кріорідина)

Посудина Дьюара складається з двох частин: внутрішня посудина 7, заповнена кріорідиною 10, міститься всередині зовнішньої посудини 3, а між ними – вакуумований простір 9, який для зменшення випромінювального теплообміну між посудинами заповнюють теплоізоляційними матеріалами. Для великих посудин передбачений трубопровід заповнення та спорожнення 6

(може бути один спільний трубопровід, або два окремих). Газоскидна лінія 5 з газовим колектором 4 передбачені для виходу пари кріорідини, що утвориться внаслідок теплонадходжень, для уникнення зростання тиску у внутрішній посудині та її руйнування. Для посилення конструкції обидві посудини мають кільця жорсткості, відповідно 1 і 8. Огляд та ремонт внутрішньої посудини здійснюють через лаз 2.

Форма кріорезервуарів може бути довільною, але для зменшення площі поверхні резервуара їх виготовляють сферичними чи циліндричними з напівсферичними денцями, що мають мінімальне відношення площі до об'єму, а отже і мінімальні питомі теплонадходження.

Внутрішня посудина безпосередньо контактує з кріорідиною. Тому її виготовляють з матеріалів, стійких до впливу кріогенних температур (спеціальні сталі, дюралюміній, інколи мідь). Ці матеріали дорогі, тому внутрішню посудину прагнуть зробити з якомога тоншими стінками. У такому разі для забезпечення стійкості оболонки необхідні кільця жорсткості. Інколи щоб не заважати системі підвісок кільця жорсткості розташовані всередині внутрішньої посудини. У такому разі у нижній частині кілець роблять отвори, щоб повністю міг спорожнитися кріорезервуар. Внутрішня посудина, як правило, перебуває під невеликим тиском. Кріорідина може видаватися з кріорезервуара за допомогою самонаддуву (під тиском власної пари), наддувом газу високого тиску чи насосом (для особливо крупних систем). У внутрішній посудині необхідний газовий простір близько 10% від загального об'єму для запобігання різкому зростанню тиску та руйнуванню посудини, а також для невеликого запасу за місткістю.

Зовнішня посудина не підлягає впливу кріогенних температур, тому її найчастіше виготовляють з вуглецевої сталі. Проте у місцях виходу трубопроводів потрібні втулки з неіржавіючої сталі, адже тут можливий тимчасовий контакт з кріогенними температурами. Обов'язковими для зовнішньої посудини є кільця жорсткості: для втримання ваги внутрішньої посудини та забезпечення стійкості зовнішньої оболонки. Кільця жорсткості зовнішньої посудини водночас є і опорними – на них встановлюють кріорезервуар на фундамент чи платформу. Короткі циліндричні посудини мають 2 кільця, у довгих – між двома опорними розташовують ще декілька кілець.

Внутрішня посудина закріплюється у зовнішній за допомогою *системи підвісок* – розтяжок з високоміцної неіржавіючої сталі, бандажів, опор (труб) зі спеціальних пластмас, що працюють на стиснення.

Трубопроводи, що проходять крізь шар теплоізоляції, є тепловими містками, тому їх слід проектувати таким чином, щоб забезпечити максимальну довжину та мінімальну товщину стінок. У місцях проходження через стінку посудини використовують вакуумні втулки для зменшення теплонадходжень, а також сильфони (найчастіше на втулках) для компенсації термічних подовжень.

Запобіжні пристрої необхідні для уникнення руйнування посудин у аварійних ситуаціях. На газоскидному трубопроводі встановлюють запобіжний клапан, налаштований на 110% від робочого тиску у внутрішній посудині, а також розривні мембрани на внутрішній та зовнішній посудинах.

Для зменшення втрат кріорідини використовують посудини з *газоохолоджуваними екранами* (рис. 37). Вони являють собою декілька концентричних посудин, у внутрішній з яких перебуває кріорідина. Пара кріорідини, що утворюється внаслідок теплонадходжень, по черзі проходить крізь зазори між посудинами, сприймаючи теплонадходження та виносячи їх у довкілля. Таким чином, теплонадходження до кріорідини у внутрішній посудині зменшуються.

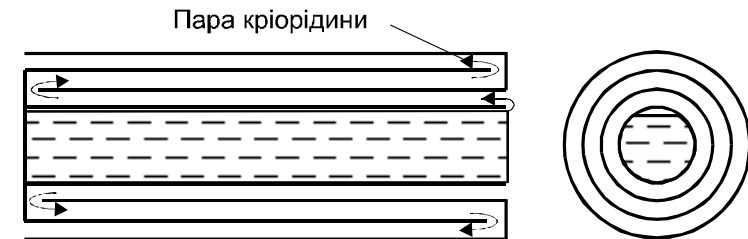


Рис 37. Газоохолоджувані екрани

Іншим рішенням для зменшення втрат кріорідини є газоскидна лінія у формі змієвика між посудинами. Пара проходить через змієвик, охолоджує теплоізоляційний матеріал і зменшує теплонадходження до внутрішньої посудини. При цьому зростає і довжина газоскидної лінії, а отже і теплонадходження через трубопровід. Проте таке рішення значно здорожує конструкцію посудини. Найчастіше його використовують для зберігання зрідженого гелію, тоді втрати кріорідини через випаровування знижуються у 4-5 разів, тоді як подібне рішення для азоту скоротить втрати кріорідини лише у 1,2 рази.

9.2. Ізоляція кріорезервуарів.

Для ізоляції кріорезервуарів використовують різні матеріали, кожен з яких має певні переваги та недоліки.

Пінопласти (пінополіуретан, пінополістирол, піноскло, піногума тощо) порівняно дешеві, мають досить високу міцність і не потребують жорсткого вакуумованого кожуха. З пінопластів виготовляють аркуші, шкарлупи, труби. Для кріорезервуарів краще використовувати пінопласти, наповнені CO_2 , який при кріогенних температурах десублімується, створюючи вакуум у порах пінопласту. Коефіцієнт теплопровідності таких матеріалів лежить у межах 25...55 мВт/(м·К). Недоліками пінопластів є горючість, велика термічна

деформація, що призводить до розтріскування, а також те, що в процесі експлуатації можлива дифузія повітря чи парів кріорідини всередину пінопласту, що призводить до зростання теплопровідності ізоляційної конструкції.

Газонаповнені порошкові та волокнисті матеріали, такі як скловолокно, мінеральна вата, перліт, коркова крихта (20...50 мВт/(м·К) доцільно використовувати для теплоізоляції поверхонь складної форми. Такі матеріали дешеві, переважно негорючі, проте обов'язково потребують пароізоляції, адже у разі проникнення водяної пари з повітря можливі її конденсація (підвищення теплопровідності) або замерзання (руйнування конструкції). Інколи для осушення матеріалу використовують продування осушеним азотом. Для низькотемпературних кріорідин (гелій, водень) всередині теплоізоляції можлива конденсація або і замерзання навколишнього повітря, чого також слід уникати. Також з часом можливе злежування порошку, що призведе до утворення локальних теплових містків.

Вакуумну теплоізоляцію використовують для малих лабораторних посудин. Вона передбачає наявність високого вакууму між зовнішньою та внутрішньою посудинами (як у термосі). У такому разі основний теплообмін між посудинами здійснюватиметься шляхом теплового випромінювання. Для зменшення цього теплообміну на поверхні стінок наносять шар матеріалу з високою відбивною здатністю, а для додаткового зменшення використовують екрани з таких матеріалів. Потреба у високому вакуумі та використання дорогих матеріалів (зокрема срібла) здорожують конструкцію. Перевагами вакуумної ізоляції є простота ізоляції поверхонь складної форми, малі втрати на заохолодження, малий тепловий потік.

Вакуум-порошкові та вакуум-волокнисті теплоізоляції поєднують переваги двох попередніх типів. У таких конструкціях вакуумований кожух заповнюють зернистим чи волокнистим матеріалом (перліт, силікат кальцію, фіброскло), що дає змогу отримати коефіцієнт теплопровідності 0,8...1,9 мВт/(м·К). У такому разі потрібен менш глибокий вакуум ніж для вакуумної ізоляції. Найчастіше такі теплоізоляції використовують для ізоляції кріорезервуарів зі зрідженим азотом. Особливістю вакуумування у цьому разі є потреба у фільтрах перед вакуум-насосом для уникнення винесення порошку до насоса. Також слід уникати злежування порошку і утворення теплового містка.

Різновидом цього типу є *відбивні порошкові ізоляції* – для зменшення теплопереносу випромінювання у вакуумовані порошки додають алюмінієву (ефективніше) чи мідну (безпечніше у разі контакту з киснем) пудру у кількості 40-50% за масою. При збереженні переваг вакуум-порошкових ізоляцій такі конструкції мають нижчий коефіцієнт теплопровідності (0,33...0,6 мВт/(м·К). Проте вони дещо дорожчі, до того ж алюмінієва пудра незастосовна для кріорезервуарів із зрідженим киснем – при контакті її з киснем можливий вибух.

Багатошарові теплоізоляції являють собою по чергово склеєні шари алюмінієвої фольги (0,006 мм) та склопаперу (0,15 мм). Фольга відбиває випромінювання, склопапір має низьку теплопровідність. Як правило, такі конструкції вакууюють, що значно скорочує дифузію. Коефіцієнт теплопровідності багатошарової теплоізоляції становить 0,03...0,1 мВт/м·К. Її перевагами є мала вага, малі витрати на заохолодження, неможливість злежування, а недоліками – висока вартість, наявність повздовжньої теплопровідності (по фользі), важкість теплоізолювання поверхонь складної форми, потреба у глибокому вакуумі.

9.3. Транспортування кріорідин

Для транспортування кріорідин на великі відстані застосовують посудини Дьюара (як правило, циліндричної форми), встановлені на автомобільне шасі, залізничну платформу чи морський транспорт.

Для транспортування на малі та середні відстані застосовують *трубопроводи*:

1) неізольовані – для транспортування на малі відстані і протягом короткого часу (наприклад 1 година на тиждень). У такому разі монтувати дорогий кріотрубопровід нерентабельно. На поверхні неізольованого трубопроводу одразу утворюється шар інею з повітря, що відіграє роль теплоізоляції.

2) ізольовані поруватими матеріалами (піни поліуретанова та полістирольна, фіброскло), теплоізоляційний матеріал наноситься безпосередньо на трубопровід. Такі конструкції потребують захисту від вологи та конденсації повітря.

3) з вакуумною ізоляцією, коли труба оточена герметичним кожухом, всередині якого вакуум чи вакуум-порошкова ізоляція. Ці конструкції найбільш досконалі, проте і найдорожчі.

Під час роботи кріотрубопроводів спостерігаються значні коливання температур (декілька сотень К), а отже і значні термічні деформації. Для компенсації цих деформацій використовують сильфонні чи П-подібні компенсатори.

У довгих секціях кріотрубопроводів використовують опори для дистанціювання внутрішньої труби від зовнішньої. Опори виготовляють з плексигласу чи фторопласту: для труб малого діаметру – трикутної чи квадратної форми з отвором посередині для проходження внутрішньої труби, для труб великого діаметру – з роликками.

Арматура кріотрубопроводів також має ряд особливостей. Зокрема використовують кріовентилі з подовженим шпинделем. Для зменшення теплонадходжень з довкілля через шпindel його довжину збільшують до 200-300 мм за допомогою циліндричної тонкостінної проставки. Додатковою перевагою такої конструкції є те, що ущільнення шпинделя працює при температурі довкілля (дешевша і надійніша конструкція), до того ж маховик

перебуває при температурі доквілля, що зменшує ризик обмороження персоналу.

Також використовують кріовентилі з подовженим шпинделем та вакуумованим кожухом. Вони зберігають переваги попереднього типу, проте значно зменшуються теплонадходження до кріорідини через арматуру. Недоліком такої арматури є її складність та висока вартість.

При проектуванні кріотрубопроводів слід пам'ятати, що за рахунок теплонадходжень йтиме випаровування кріорідини, отже потік буде двофазним. Слід звертати увагу на процес заохолодження кріотрубопроводу. На початку його роботи, коли температура труб дорівнює температурі доквілля, кріорідина, що надходить до трубопроводу повністю випаровується, охолоджуючи частину трубопроводу. Холодна пара охолоджує трубопровід, нагріваючись до температури на виході (вона лежить між температурою насичення кріорідини і температурою доквілля і постійно знижується), після чого виходить з трубопроводу. За довжиною трубопроводу у різні моменти часу спостерігатимуться різні режими двофазної течії. Після завершення заохолодження пара не буде виходити з трубопроводу. Кількість випареної кріорідини, необхідну для заохолодження, та його тривалість визначають розрахунковим шляхом.

Порядок теплового розрахунку посудини Дьюара

Вихідні дані: частка заповнення посудини; уявний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції; геометричні розміри внутрішньої та зовнішньої посудин; матеріал, кількість та розміри стрижнів кріплення і трубопроводів; температури кріорідини у посудині та навколишнього середовища.

1. Теплонадходження через ізоляцію навколо обичайки, Вт (термічними опорами тепловіддачі з боків кисню та повітря рекомендується знехтувати через великий термічний опір шару теплоізоляції),

$$Q_1 = \frac{2\pi\lambda_{i3}L(T_{\text{зов}} - T_{\text{рід}})}{\ln\left(\frac{D_{\text{зов}}}{D_{\text{вн}}}\right)}, \quad (83)$$

де λ_{i3} – уявний коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м·К); L – довжина обичайки, м; $T_{\text{зов}}$, $T_{\text{рід}}$ – відповідно температури зовнішнього повітря та рідини в посудині, К; $D_{\text{зов}}$, $D_{\text{вн}}$ – діаметри відповідно зовнішньої та внутрішньої посудин, м.

2. Теплонадходження через ізоляцію навколо двох напівсферичних донець, Вт,

$$Q_2 = 2 \cdot 2\pi\lambda_{i3}(T_{\text{зов}} - T_{\text{рід}}) \frac{D_{\text{зов}}D_{\text{вн}}}{D_{\text{зов}} - D_{\text{вн}}}. \quad (84)$$

3. Теплонадходження через стрижні кріплення, Вт,

$$Q_3 = \frac{\pi d_{\text{ст}}^2 \lambda_{\text{ст}}}{4} (T_{\text{зов}} - T_{\text{рід}}) \sum \frac{n_{\text{ст}}}{l_{\text{ст}}}, \quad (85)$$

де $\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стрижня, Вт/(м·К); $d_{\text{ст}}$ – діаметр стрижнів, м; $n_{\text{ст}}$ – кількість у конструкції стрижнів завдовжки $l_{\text{ст}}$.

4. Теплонадходження через ізольовані трубопроводи, Вт

$$Q_4 = \sum \frac{\lambda_{\text{тр}} \pi (D_{\text{тр}} - \delta_{\text{тр}}) \delta_{\text{тр}}}{l_{\text{тр}}} (T_{\text{зов}} - T_{\text{рід}}), \quad (86)$$

де $\lambda_{\text{тр}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубопроводу, Вт/(м·К); $D_{\text{тр}}$ – зовнішній діаметр трубопроводу, м; $\delta_{\text{тр}}$ – товщина стінки трубопроводу, м; $l_{\text{тр}}$ – довжина трубопроводу, м.

5. Сумарні теплонадходження до посудини, Вт,

$$Q_{\text{тн}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (87)$$

6. Маса зрідженого кисню, випарованого за 1 с, кг/с,

$$m = \frac{Q_{\text{тн}}}{r_{\text{O}_2}}, \quad (88)$$

де r_{O_2} – питома теплота випаровування рідкого кисню, кДж/кг. За тиску у посудині 0,1 МПа $r_{\text{O}_2} = 213 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

7. Частка кисню, випаровуваного за добу, %:

$$\Delta = \frac{24 \cdot 3600 \cdot m \cdot 100}{M}, \quad (89)$$

де M – маса рідини у посудині, кг.

$$M = \frac{A}{100} V \rho_{\text{к}}, \quad (90)$$

де A – частка заповнення посудини, %; V – об'єм посудини, м³; $\rho_{\text{к}}$ – густина рідкого кисню, кг/м³; за тиску у посудині 0,1 МПа $\rho_{\text{к}} = 1141 \text{ кг/м}^3$

$$V = \pi D_{\text{вн}}^2 \left(\frac{L}{4} + \frac{D_{\text{вн}}}{6} \right) \quad (91)$$

10. КРІОРЕФРИЖЕРАТОРИ

10.1. Кріорефрижератори для температур вище 1 К

Кріорідини, отримані за допомогою систем зрідження та розділення, можна використати для безпосереднього охолодження об'єкта (наприклад шляхом зрошення чи занурення), але при цьому газ, що випарувався, втрачається. Для безперервного відведення теплоти від об'єкта за кріогенних температур доцільніше застосувати кріорефрижератори. Найпростіші з них – рефрижератори, що базуються на системах зрідження, призначені для отримання температур вище 1К. Вони відрізняються від систем зрідження тим, що замість посудини-сепаратора для зрідженого газу встановлено теплообмінник-випарник, що поглинає теплоту об'єкта q_x , або кріорідина з сепаратора відводиться на подібний теплообмінник. Газ, що утворюється у випарнику, відводиться через сепаратор і регенеративний теплообмінник на компресор. Робоче тіло циклу в ідеалі не втрачається. Крім того, з'являється можливість підтримуючи у випарнику тиск нижчий за атмосферний, отримати температуру кипіння нижче ніж при зрошуванні об'єкта кріорідиною.

Для прикладу на рис. 38 зображений кріорефрижератор Лінде з одноразовим дроселюванням. Існують також каскадні кріорефрижератори, кріорефрижератори з попереднім охолодженням, кріорефрижератори Клода.

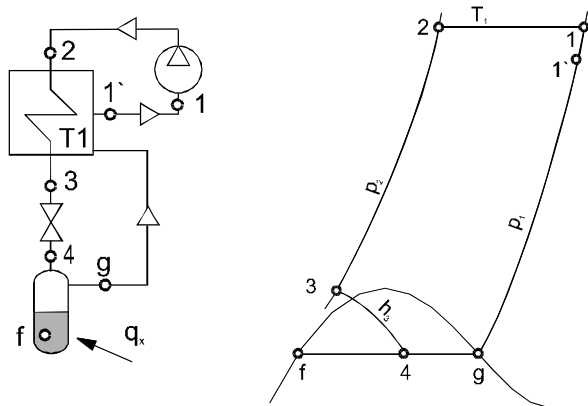


Рис. 38 Принципова схема та цикл кріорефрижератора Лінде

Для температур вищих за 1 К існують також інші кріорефрижератори. Кріорефрижератор Філіпса (рис. 39), робочим тілом якого є гелій чи водень, працює за оберненим циклом Стірлінга. Газ ізотермічно стискається у правій половині циліндра (процес 1–2), при цьому теплота Q_1 відводиться охолодною водою. Потім газ проштовхується крізь регенератор до лівої половини циліндра, при цьому ізохорно охолоджується (процес 2–3). Далі газ ізотермічно розширюється до початкового тиску з виконанням роботи (процес

3–4), а потім проштовхується крізь регенератор до правої половини циліндра, ізохорно нагріваючись (процес 4–1). Температурний рівень, забезпечуваний рефрижератором, настільки низький ($T_2=77$ К), що на зовнішній (оребрений) поверхні холодного циліндра утворюється зріджене повітря з атмосфери.

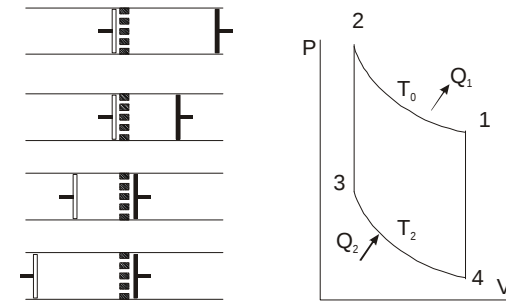


Рис. 39 Схема та цикл кріорефрижератора Філіпса

Особливістю кріорефрижератора Вюлемьє-Таконіса (рис. 40) є можливість працювати без витрати зовнішньої роботи з використанням трьох джерел теплоти на різних температурних рівнях. Це робить його привабливим у випадках, коли джерела механічної енергії відсутні, або слід уникнути значних вібрацій.

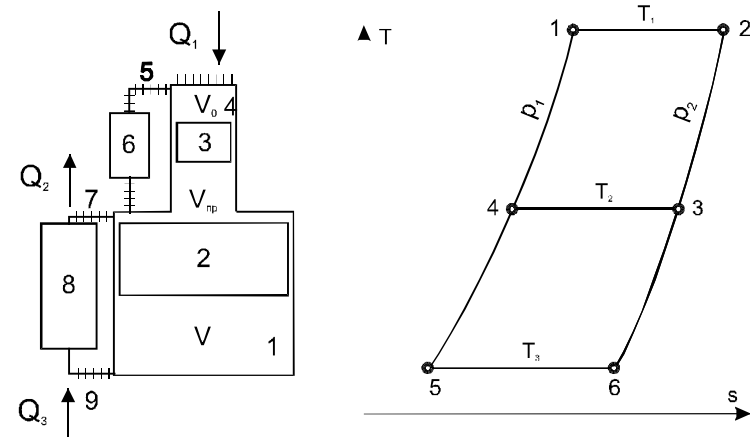


Рис. 40 Схема та цикл кріорефрижератора Вюлемьє-Таконіса

Рефрижератор має два соосні циліндри різного діаметру 1 і 4, у яких встановлені витіснювачі 2 і 3. У рефрижераторі встановлені теплообмінники 5,

7, 9 і регенератори 6 і 8. Робочий об'єм машини постійний (якщо не враховувати термічне розширення матеріалів). Тиск у циклі міняється за рахунок теплообміну з джерелами теплоти. Теплота підводиться до робочого тіла у гарячому циліндрі 4, тоді як витіснювач 3 рухається вниз для підтримання сталої температури газу T_1 (процес 1–2). У той самий час газ, що має температуру близьку до температури довкілля проходить з проміжного об'єму $V_{пр}$ через регенератор 6 до гарячого об'єму V_0 (процес 4–1). Потім витіснювач 6 рухається вгору і виштовхує газ з гарячого об'єму V_0 до проміжного $V_{пр}$ (процес 2–3). Для підтримання у об'ємі $V_{пр}$ сталої температури T_2 від нього відводиться теплота Q_2 . Під час руху холодного витіснювача 2 вгору теплота Q_3 підводиться до газу у об'ємі V від низькотемпературного джерела для підтримання сталою температури T_3 (процес 5–6). Газ із об'єму $V_{пр}$ проходить крізь регенератор 8 до холодного об'єму V (процес 4–5). Потім холодний витіснювач рухається вниз і газ виштовхується із об'єму V до об'єму $V_{пр}$ через регенератор 8 (процес 6–3).

Метод охолодження Саймона передбачає охолодження балона стисненого до 15 МПа гелію у ванні з водневою шугою до 10-20K та випускають через вентиль. Газ, що лишається у балоні, охолоджується, тому що виконує роботу по переміщенню газу, що виходить назовні (вихлопу). На такому принципі ґрунтується принцип дії кріорефрижератора Гіффорда–Мак-Магона з витіснювачем (рис. 41), який використовують для охолодження елементів радіоелектронних та комп'ютерних мікросхем (температурний рівень 20...50 K, холодопродуктивність до 1 Вт).

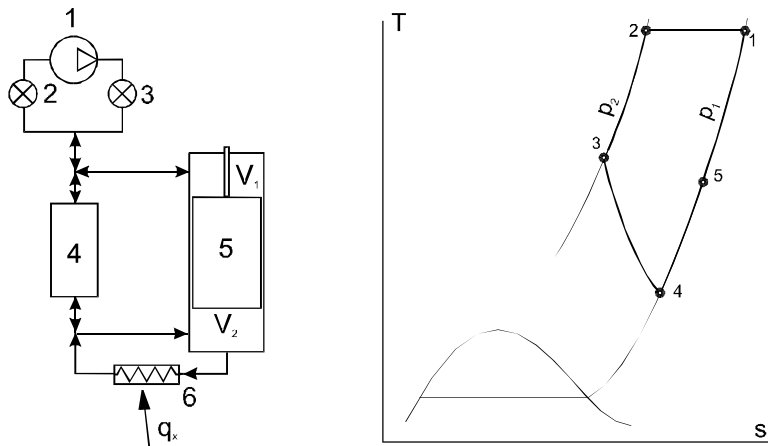


Рис. 41 Схема та цикл кріорефрижератора Гіффорда–Мак-Магона (1 – компресор; 2, 3 – клапани; 4 – регенератор; 5 – витіснювач; 6 – теплообмінник).

Кріорефрижератор Гіффорда–Мак-Магона з витіснювачем працює таким чином (нумерація процесів відповідає циклу).

Процес 1–2. Витіснювач 5 перебуває у нижній частині циліндра (при цьому об'єм $V_2 \approx 0$, а об'єм V_1 – максимальний), впускний клапан 2 відкритий. Тиск у об'ємі V_1 зростає від тиску p_1 до тиску p_2 . Теплота відводиться у довкілля, так щоб процес стисання в ідеалі був ізотермічним.

Процес 2–3. При відкритому впускному клапані 2 та закритому нагнітальному клапані 3 витіснювач 5 рухається вгору. При цьому газ із тиском p_2 із об'єму V_1 через регенератор 4 рухається до об'єму V_2 . При цьому газ у регенераторі охолоджується, його об'єм зменшиться, і через впускний клапан до циліндра всмоктуватиметься додатковий об'єм газу (тиск підтримуватиметься сталим).

Процес 3–4. Витіснювач 5 перебуває у верхньому положенні ($V_1 \approx 0$), впускний клапан 2 закритий, нагнітальний клапан 3 відкритий. Газ у об'ємі V_2 розширюється до тиску p_1 , таким чином, газ, що залишиться у цьому об'ємі під час розширення виконує роботу з виштовхування решти газу і від нього відводиться енергія. Це викличе охолодження газу у об'ємі V_2 .

Процес 4–5. Витіснювач 5 рухається вниз. При цьому газ із низькою температурою із об'єму V_2 рухається до об'єму V_1 через теплообмінник 6, відбираючи теплоту від об'єкта охолодження та нагріваючись. Окремі порції газу, що виходить, будуть мати все нижчу й нижчу температуру.

Процес 5–1. Газ із теплообмінника 6 через регенератор 4, нагріваючись практично до температури довкілля, повертається на компресор 1. Коли тиск у V_2 знизиться до p_1 , витіснювач перештовхне газ, що залишився через регенератор 4 у об'єм V_1 . Цикл повторюється.

Перевагами кріорефрижератора Гіффорда–Мак-Магона є відсутність великих перетікань через ущільнення (малий перепад тисків) та простота механічного приводу витіснювача.

Також для безперервного одержання температур до 4 K використовують каскадні установки з вихорових труб Ранка (див. п. 2.6), робочими тілами яких є азот, водень та гелій. Незважаючи на дуже малий холодильний коефіцієнт така установка є простою і надійною. Також використовують установки десорбційного охолодження (див. п. 2.6).

Для отримання температур понад 150K, зокрема для попереднього охолодження, використовують рефрижератори, що базуються на ефекті Пельтьє (див. п. 2.6).

10.2. Рефрижератори для одержання температур нижче 1K

Особливістю температурної зони нижче 1 K є те, що практично всі речовини (за винятком гелію) у ній перебувають у твердому стані. Тому кріорефрижератори, на базі систем зрідження чи стиснення-розширення не можуть у ній працювати. Для отримання наднизьких температур

використовують зокрема магнітні рефрижератори (рис. 42), що ґрунтуються на адіабатному розмагнічуванні парамагнетиків (див. п. 2.5). Їх ідею висунули Дж. Даунт і К. Геер (США) у 1949 р., а перший пристрій був створений у 1953 р.

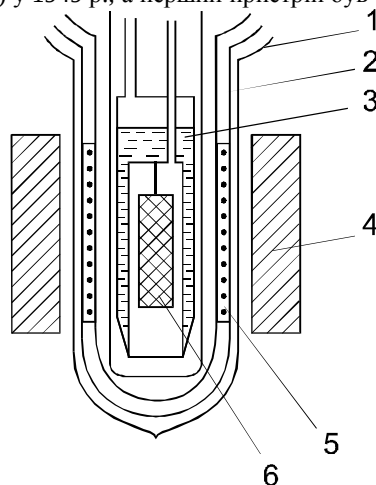


Рис. 42. Метод магнітного охолодження (1 – посудина Дьюара; 2 – зріджений водень; 3 – зріджений гелій; 4 – полюси магніту; 5 – витки магнітного термометра; 6 – парамагнітна сіль).

Парамагнетик 6 (сульфат гадолінію, залізні галуни) поміщують у контейнер з гелієм, що відіграє роль теплообмінного газу, а контейнер – у ванну з рідким гелієм 3 під вакуумом (температура у ванні становить близько 1 К). Для теплоізоляції використовують зріджений водень 2. Температура контролюється за допомогою магнітного термометра 5. Після охолодження парамагнетик намагнічують при сталій температурі між полюсами магніту 4. Теплота, що виділяється під час намагнічування, передається рідкому гелію. Потім з контейнера відкачують теплообмінний газ, внаслідок чого створюються адіабатні умови, і знімають магнітне поле. Внаслідок розмагнічування температура парамагнетика знижується (значно нижче 1 К). Процес намагнічування-розмагнічування повторюється циклічно, внаслідок чого у контейнері можна підтримувати температуру близько 0,01 К протягом тривалого часу.

Принцип роботи рефрижератора розчинення (рис.43) ґрунтується на особливих властивостях ізотопів зрідженого гелію. Як зазначалося у лекції 5, ^3He розчиняється у ^4He , а при $T < 0,827\text{K}$ ця суміш сама сепарується на 2 фази: верхня – чистий ^3He нижня – слабкий розчин ^3He у ^4He – надтекуча фаза. Перехід ^3He до нижньої фази еквівалентний його випаровуванню, при цьому поглинається теплота.

Практично чистий ^3He стискається у вакуум-насосі від 4 Па до 4 кПа, і поетапно охолоджується у теплообміннику та ванні зі зрідженим гелієм (4,2 К), а потім конденсується при проходженні через ванну з киплячим гелієм (1,2 К). Рідкий ^3He дроселюється і додатково переохолоджується у конденсаторі, що працює при температурі 0,6 К та у теплообміннику. У камері змішування рідкий ^3He змішується з ^4He і ця суміш сама розділяється на дві фази – збагачену ^3He та збіднену ^3He . Молекули ^3He дифундують зі збагаченої фази у збіднену (при цьому для підтримання сталої температури підводиться теплота). Розбавлена суміш повертається через теплообмінник в конденсатор, де підводиться теплота для виділення ^3He із суміші. У рідкій фазі концентрація ^3He становить близько 1 %, а у газовій – 95...98%.

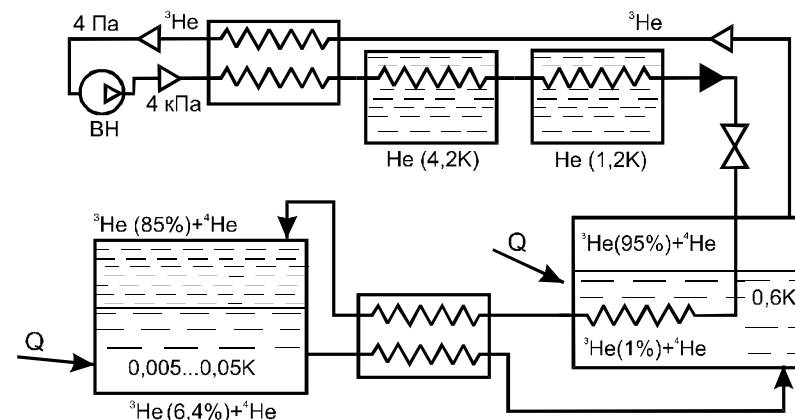


Рис. 43. Схема рефрижератора розчинення

За останній час створено кріорефрижератори розчинення, здатні протягом тривалого часу підтримувати температуру нижче 0,01 К. Істотною перевагою кріорефрижераторів розчинення порівняно з магнітними є те, що у них можна охолоджувати порівняно крупні об'єкти у безперервному режимі. Їх використовують як окремі установки, а також як перший ступінь установки ядерного магнітного охолодження (температури порядку 0,001 К).

Порядок розрахунку кріорефрижератора Лінде – Хемпсона

Вихідні дані: назва робочого тіла; температура робочого тіла перед компресором T_1 , тиск $p_1 = 0,1$ МПа. Тиск стиснення p_2 . Температура кипіння у випарнику T_0 . Недорекуперація у теплообміннику $\Delta T_{\text{нр}}$. Теплонадходження до системи $Q_{\text{пр}}$.

1. Накреслити схему рефрижератора (рис. 38). Від схеми зріджувача (рис. 23) вона відрізняється тим, що зріджений газ не відбирається і підживлення системи свіжим газом не здійснюється.

2. Побудувати цикл у T-s-діаграмі (додатки 1, 2) та визначити параметри речовини у точках циклу 1, 1', 2, 3, 3'. Тиск у випарнику визначити за T-s-діаграмою, як тиск насичення для температури кипіння у випарнику, T_0 .

Результати занести до таблиці (див. табл. 2).

3. Холодопродуктивність теоретичного циклу, кДж/кг

$$q_{\text{хт}} = h_1 - h_2. \quad (92)$$

4. Втрати від недорекуперації, кДж/кг:

$$q_{\text{нр}} = h_{3'} - h_3 = h_1 - h_{1'}. \quad (93)$$

5. Холодопродуктивність дійсного циклу:

$$q_{\text{х}} = q_{\text{хт}} - q_{\text{нр}} - q_{\text{тн}}, \quad (94)$$

де $q_{\text{тн}}$ – величина теплонадходжень до системи, кДж/кг.

6. Теоретичні та дійсні питомі витрати роботи відповідно:

$$l_{0\text{т}} = \frac{RT_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{h_1 - h_2}; \quad (95)$$

$$l_0 = \frac{RT_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{(h_1 - h_2 - q_{\text{тн}})\eta_{\text{із}}}. \quad (96)$$

7. Холодильні коефіцієнти теоретичного і дійсного циклів:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{1}{l_{0\text{т}}}; \quad (97)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{l_0}. \quad (98)$$

11. КРІОГЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ

11.1. Розділення газових сумішей та одержання кріорідин

У промисловості часто необхідно розділяти газові суміші: з повітря отримують азот, кисень, аргон, виділяють компоненти природного газу (метан та ін.), отримують водень з коксового газу тощо. Кріорідини та чисті гази, отримані з них, широко використовують у різноманітних кріогенних технологіях як холодоагенти, холодоносії, охолодні середовища. Чистий кисень застосовують у медицині, авіації, ракетно-космічній техніці, для зварювання та різання сталі, у доменних печах та конверторах. Інертні гази (неон, аргон) використовують у електричних лампах та для створення інертних середовищ (зокрема під час електрозварювання).

Універсальні кисневодобувні станції (рис. 44) призначені для вироблення газоподібного чи рідкого медичного азоту чи кисню [10]. Отримані гази не мають запаху, вільні від водяної пари, мастила, ацетилену і шкідливих домішок. Установки працюють в стаціонарних умовах (СКДС) або на автомобілях (АКДС). Такі станції встановлюють при підприємствах та організаціях, що потребують кисню або азоту (газоподібного чи зрідженого): металургійні підприємства, аеродроми та космодроми, лікарні, будівельно-монтажні організації та ін.

Станції складаються з компресорного, технологічного та допоміжного обладнання. Вони розраховані для роботи в районах з помірним кліматом в діапазоні температур навколишнього повітря 223...323K (–50...+50°C).

Станція може працювати в одному з таких режимів: вироблення рідкого чи газоподібного кисню, одночасне вироблення рідкого та газоподібного кисню; вироблення рідкого чи газоподібного азоту, одночасне вироблення рідкого та газоподібного азоту. Одночасне вироблення азоту та кисню не передбачене. У разі зменшення продуктивності за азотом (чи киснем) можливе відбирання до 100 м³/год очищеного повітря тиском до 20 МПа (200 кгс/см²). На перемикання з одного режиму до іншого необхідно 40...60 хвилин.

Принцип роботи станції базується на циклі високого тиску з детандером. Повітря, стиснене у компресорі, надходить на блок очищення та осушення. Тиск стиснення для отримання зріджених кисню та азоту становить 18...20 МПа, для отримання газоподібного кисню 13...14 МПа, для отримання газоподібного азоту 15,5...18 МПа. Насамперед повітря охолоджується у зріджувачі вологи 6 продуктами розділення повітря. до 278...280 К. Волога, що сконденсувалася в процесі охолодження видаляється у вологовіддільнику 1. Далі повітря очищують від залишків вологи, двоокису вуглецю, вуглеводнів методом адсорбції на синтетичних цеолітах у балонах 2. Балони працюють по чергово: протягом 10 годин один з них очищує газ, а другий регенерується азотом, нагрітим у електропідігрівнику 3 до 653 К. Регенерація триває протягом 3 годин, після чого цеоліт у балоні охолоджують тим самим азотом. Після закінчення регенерації балон вмикають у роботу, а другий ставлять на регенерацію.

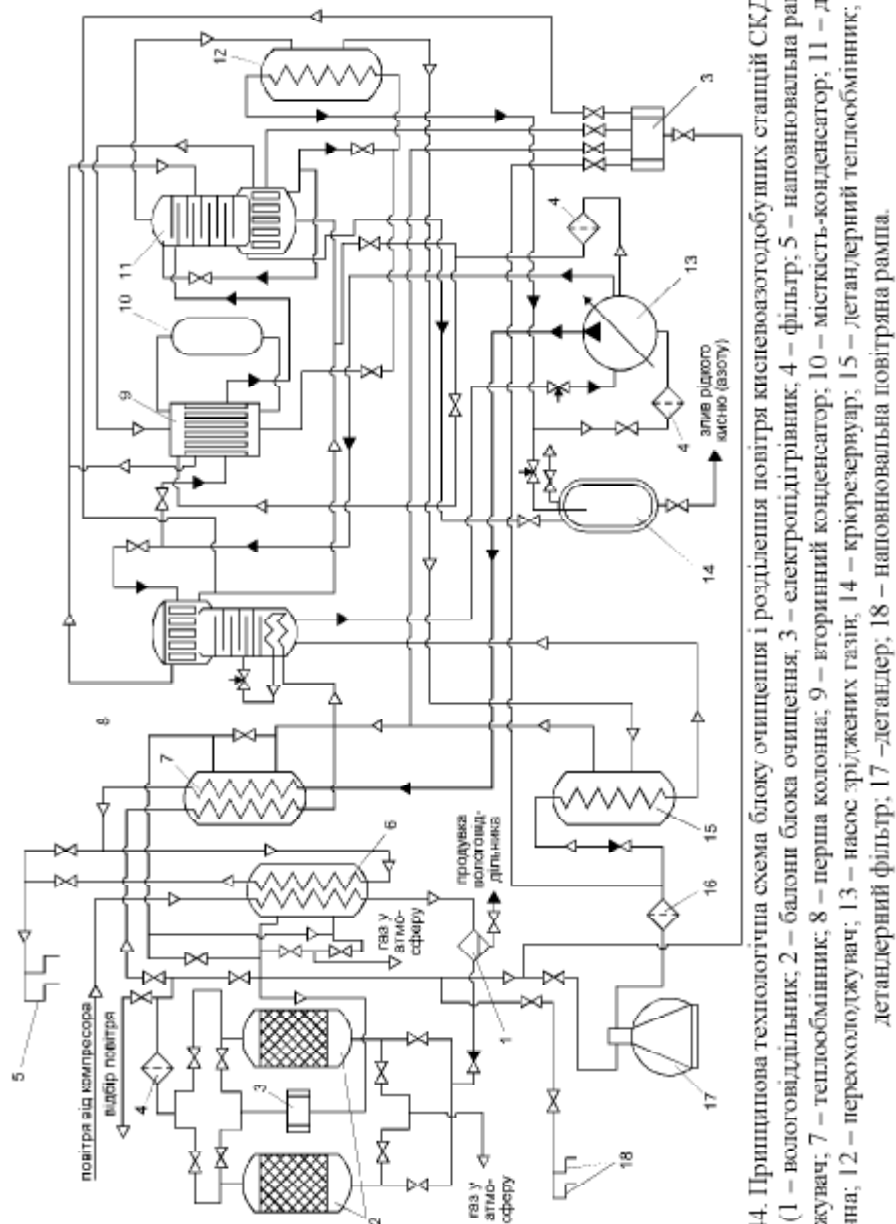


Рис. 44. Принципова технологічна схема блоку очищення і розділення повітря кисневозатодобутих станцій СКДС та АКДС (1 – вологовидільник; 2 – балони блока очищення; 3 – електроподігрівник; 4 – фільтр; 5 – наповнювальна рампа; 6 – зріджувач; 7 – теплообмінник; 8 – перша колонна; 9 – вторинний конденсатор; 10 – меткість-конденсатор; 11 – друга колонна; 12 – переохолоджувач; 13 – насос зріджених газів; 14 – криореагуюч; 15 – детандерний теплообмінник; 16 – детандерний фільтр; 17 – детандер; 18 – наповнювальна повітряна рампа.

З очищеного повітря видаляють механічні домішки (насамперед залишки сорбенту) у фільтрі 4. Після фільтра можна відбирати чисте стиснене повітря, що через рампу 18 заповнюють у балони. Решта повітря розділяється на два потоки. Один з них подається на теплообмінник 7, охолоджується і частково конденсується, підігріваючи продукти розділення повітря, а потім надходить до змійовика ректифікаційної колони 8. У змійовику повітря доохолоджується за рахунок випаровування частини кубової рідини і дроселюється у колону 10. Другий потік відбирають на детандер 17, після розширення у якому до тиску 0,5...0,6 МПа повітря очищують у фільтрі 16 та подають на теплообмінник 15, де воно охолоджує зворотний потік газу з колони 11, а потім подають до кубу колони 8.

Під час вироблення газоподібного кисню збагачене киснем зріджене повітря (кубова рідина) з куба колони 8 дроселюється і насосом 13 частково подається до міжтрубного простору конденсатора, розташованого у верхній частині колони 8. У ньому випаровується кубова рідина, за рахунок чого утворюється азотна флегма для зрошення колони 8(?). Пари кубової рідини з цього конденсатора надходять на тарілки середньої частини колони 11 і беруть участь у ректифікації. Частина кубової рідини надходить до міжтрубного простору вторинного конденсатора 9, у трубах якого конденсується продукційний кисень. Парорідинна суміш кубової рідини вторинного конденсатора також надходить у середню частину колони 11.

Частина газоподібного азоту, що утворюється внаслідок ректифікації у колоні 10 з її верхньої частини надходить до конденсатора, розташованого у нижній частині колони 11. Тут азот конденсується завдяки частковому випаровуванню кисню, що стікає до міжтрубного простору конденсатора. Зріджений азот відбирається з нижньої частини міжтрубного простору конденсатора і дроселюється на верхню тарілку колони 11 для зрошення.

Внаслідок ректифікації у колоні 11 отримують газоподібний азот і рідкий кисень. Азот з верхньої частини колони по чергові проходить переохолоджувач 12, детандерний теплообмінник 15, теплообмінник 7, зріджувач 6. При цьому він підігрівається за рахунок охолодження відповідних потоків. Частина азоту використовується для регенерації адсорбенту у балонах, а решта викидається у атмосферу. Рідкий кисень випаровується у конденсаторі і у газоподібному стані піднімається по колоні 11, беручи участь у ректифікації. Газоподібний продукційний кисень з нижньої частини колони 11 надходить у вторинний конденсатор 9. Завдяки цьому кисень не виносить із собою шкідливих домішок, які могли б накопичуватися у конденсаторі колони 11 у зрідженому кисні. Зі вторинного конденсатора рідкий кисень надходить до переохолоджувача 12, де його температура знижується на 6...8 К, а потім через фільтр до насоса зріджених газів. 13. Рідкий кисень стискається до 42 МПа, проходячи через теплообмінник 7 і зріджувач 6, газифікується, нагрівається і закачується у балони на наповнювальній рампі 5.

Під час вироблення зрідженого кисню процес проходить аналогічно, але насос зріджених газів не працює, а зріджений кисень стікає до посудини Дьюара 14, звідки періодично відбирається до тари споживачів. При

одночасному виробленні рідкого та газоподібного кисню кількості обох продуктів визначаються продуктивністю насосу зріджених газів 13 та тиском стиснення повітря.

При отриманні газоподібного азоту установка працює майже так само. Відмінність полягає у тому, що продукційний азот відбирається з нижньої частини конденсатора колони 11 і подається до трубного простору переохолоджувача 9. звідси переохолоджена рідина потрапляє до насоса, стискається, газифікується (так само, як і кисень у попередньому режимі) і надходить на наповнювальну рампу. При роботі у цьому режимі відкидний газ містить близько 75% азоту. Для отримання вищої концентрації продукційного азоту стиснене повітря із змішувача куба колони 8 дроселюють не на восьму (як у кисневому режимі) а на першу тарілку цієї колони.

При отриманні зрідженого азоту насос 13 відключають, а рідину з переохолоджувача зливають до посудини Дьюара 14 звідки періодично відбирають до тари споживачів. Можливий також режим з одночасним виробленням зрідженого і газоподібного азоту.

Обладнання станції СКДС-100 встановлюють у типовій будівлі з легким фундаментом під машинне обладнання або в одноповерховій будівлі площею 140-200 м². Тимчасова експлуатація станції можлива також під навісом. Технологічне обладнання має бути відділене від компресорного легкою перегородкою чи змонтоване на відстані не менше 2 м. Все обладнання станції монтують на заводі поагрегатно, що забезпечує швидкий монтаж і демонтаж станції у разі необхідності її багаторазового переміщення. Станцію СКДС-100М2 можна транспортувати залізницею, автомобільним чи водним транспортом.

До комплексу поставки станцій входять: 2 повітряні компресори; система охолодження компресорів; блок розділення повітря з детандером і насосом; блок очищення і осушення повітря; газоаналізatori; арматура і система трубопроводів обв'язки компресорного і технологічного обладнання; наповнювальна рампа; комплект запасних частин. Технічні характеристики станцій наведено у додатку 4.

Крім розділення повітря актуальним є зрідження природного газу для транспортування його морським транспортом до країн, що мають нестачу власних енергоресурсів. Використовують однопоточні схеми зрідження на багатокомпонентних сумішах з попереднім охолодженням та багаторазовим дроселюванням (див. п. 6.2). Потужності заводів зрідженого природного газу (їх будують переважно у портах поблизу великих родовищ природного газу) великі – так перший російський завод зрідженого газу на Сахаліні, що почне роботу у 2008 році, має проектну потужність 9,6 млн. тон газу на рік, що становить близько 5% від світового виробництва. Газ постачатиметься енергетичним компаніям Японії, США та Кореї. Щоб краще уявити масштаби підприємства слід сказати, що теплообмінники для попереднього охолодження (до 223 К) та головні кріогенні теплообмінники, де відбувається зрідження (113

К) мають діаметр 4...4,5 м та висоту 30...40 м. Ще один завод з виробництва зрідженого природного газу проектується у Ленінградській області. Подібні заводи вже діють або будуються у країнах, що мають розвідані потужні газові родовища (Норвегія, Індія, Іран, Перу, Тринідад і Тобаго та ін).

11.2. Використання кріогенних технологій у медицині.

Використання кріогенних технологій у медицині йде у кількох напрямках:

Кріотерапія – консервативна лікувальна методика, з використанням неруйнуючих засобів. Вона відома здавна – наприклад, прикладання льоду до вражених місць, холодні ванни тощо. Пізніше у якості холодоносія для кріотерапії почали використовувати сухе холодне повітря. У 1980-х роках японським лікарем Тосімо Ямагучі був розроблений метод кріотерапії.

Для загальної кріотерапії використовують кріосауни, де за допомогою кріорефрижератора або повітряної холодильної машини підтримується температура 130...140 К. Перебування у такій камері протягом 2...3 хвилин дає змогу опустити температуру шкіри до 0°C. При цьому запускаються природні процеси регенерації шкіри – організм починає сам інтенсивно боротися з хворобою. Це дозволяє усунути висипання на шкірі. До того ж, ультранизькі температури позитивно впливають на всю імунну систему організму, а також судинну систему. Охолодження звужує судини, а після нього йде “аварійне” розширення капілярів, причому не тільки існуючих, а й резервних, що покращує кровопостачання тканин та органів, активізуючи процеси обміну речовин. При цьому температура тіла підвищується.

Таким чином лікують захворювання шкіри (псоріаз, екземи тощо), запалення суглобів, хребта, фібромосиндром та багато інших захворювань. Використовують кріосауни також для профілактики різноманітних захворювань і посилення природного імунітету організму, лікування наркоманії та зняття стресового синдрому.

Крім кріосаун використовують апарати локальної кріотерапії, що дозволяють здійснити кріомасаж – холодний вплив на окремі ділянки шкіри за допомогою струменя повітря з температурою 190...240 К. Таким чином у косметології здійснюють розгладжування зморшок, укріплення коренів волосся. Також локальна кріотерапія застосовується у ортопедії, ревматології, травматології та спортивній медицині.

Кріотерапія може використовуватися як окремо, так і у сполученні з медикаментозними засобами. Це дозволяє знизити необхідні дози ліків.

Кріодеструкція – це косметична хірургія, тобто руйнування і усунення бородавок, шрамів та інших патологічних утворень рідким азотом. Температура шкіри при цьому становить 90...120 К. Рідкий азот подається за допомогою спеціальних зондів, патогенні тканини відмирають і руйнуються, прискорюється процес регенерації здорових тканин.

Слід зазначити, що кріорідини (зокрема зріджений азот) використовуються у трансплантології та біології – у посудинах Дьюара з рідким азотом (77 К) зберігаються клітини, органи (окремо від донорського організму), організми. У медичних закладах використовують також газоподібний кисень, отриманий шляхом розділення повітря (кисневі маски, кисневі коктейлі тощо).

Локальне охолодження холодним газоподібним азотом (кріоанестезія) дозволяє деактивізувати нервові закінчення, таким чином знявши больові відчуття. Її використовують у випадках, коли застосування хімічних препаратів неприпустиме, зокрема для спортсменів під час змагань.

11.3. Кріорідини у авіації та космонавтиці.

Для сучасних рідинних реактивних двигунів, що використовуються у авіації та космонавтиці, важливою проблемою є збільшення потужності. Для досягнення цього слід вести інтенсивне окислення палива. Використовувати атмосферний кисень при цьому неможливо, адже польоти проходять у верхніх шарах атмосфери, де об'ємна концентрація кисню низька, або за межами атмосфери. Окисник доводиться брати з собою.

У якості окисника можна використовувати хімічні сполуки (перекис водню, азотну кислоту, тетроксид азоту тощо), проте вони є небезпечними у використанні. Тому частіше використовують зріджений кисень, яким управляють двигуни на землі.

При космодромах та великих аеродромах працюють станції розділення повітря, де отримують зріджені кисень та азот. Кисень, як вже зазначалося, використовується як окисник, а азот – для інтенсивного охолодження дюз реактивних двигунів ракетноносіїв під час старту.

У якості палива для космічних ракет використовують зріджений водень [15]. Висока теплота згоряння водню дає змогу зменшити масу палива, що повинна бути на борту ракети (зараз вона становить близько 90% від загальної маси ракети), а отже збільшити частку корисного навантаження. Проте є низка проблем: водень має низьку температуру конденсації, тому слід встановлювати потужну теплоізоляцію на кріогенних баках, а також є дуже легким та вибухонебезпечним. Однак ці проблеми вирішують.

Двигуни на зрідженому водні (щоправда лише як дослідні зразки) вже використовують і для автомобільного транспорту. Перевагою їх є викидання в атмосферу лише водяної пари, а недоліком – висока вартість і відсутність інфраструктури заправних станцій.

Пропонується чотири типи кріогенних двигунів.

1. Двопаливні двигуни створюються на базі існуючих двигунів. Додається система подавання водню. Вона містить: водневий бак, бустерний насос, водневі магістралі та клапани, систему продування водневих магістралей гелієм, систему регулювання, універсальний турбонасос, випарник, форсунки. Дана система універсальна і може бути використана в кріогенних двигунах

наступного покоління, включно з гіперзвуковими. Основний вузол системи – універсальний турбонасос, що може працювати з будь-яким типом двигунів. Зріджений водень подається турбонасосом до випарника, випаровується, нагрівається та рухає турбіну турбонасоса. Потім водень надходить на форсунки камери згоряння. Випарник може розташовуватися за турбіною двигуна чи під обшивкою транспорту. Слід зазначити, що перероблення двигуна полягає лише у встановленні водневих форсунок та випарника. Такий двигун має дві системи живлення паливом і може працювати як на традиційному, так і на кріогенному паливі, але не на двох одночасно.

Кріогенні газотурбінні двигуни створені під використання водню, але мають за прототипи звичайні газотурбінні двигуни. На відміну від них, кріогенні двигуни мають невелику камеру згоряння, більший ресурс турбіни, високий ступінь підвищення тиску в компресорі. Воднева система аналогічна до двопаливних двигунів. Кріогенні газотурбінні двигуни пропонують використовувати на дозвукових літаках, а також на гіперзвукових лайнерах, як проміжний двигун (зліт - посадка). У АНТК ім. А.М.Туполева вже створено модель турбіни діаметром 70 мм, що має потужність 4 кВт та частоту обертання 24000 об/хв.

Гіперзвукові двигуни зовнішнього горіння пов'язані з попередніми типами лише системою подавання палива. Решта компонентів повністю інші. Двигун не має рухомих частин (компресора, турбіни). Роль проточної частини двигуна виконує корпус літального апарата. Паливо подається безпосередньо на поверхню апарата, де спалахує через високу температуру повітря.

Ракетні двигуни використовують водень і кисень з кріогенних баків. Пропонуються для польоту у відкритому космосі.

11.4. Надпровідні технології

Надпровідні матеріали застосовують у потужних магнітах прискорювачів заряджених часток, у ланцюгах живлення потужних електричних печей, де струми сягають десятків кілоампер, в апаратурі.

Першим промисловим використанням надпровідності стало створення надпотужних магнітів. Вже в середині 1960-х рр. було створено магнітні поля понад 100 кГс (звичайні магніти для цього потребували надто великих витрат електроенергії у обмотках та охолодної води для їх охолодження). Наприкінці 1990-х років у Японії було випробувано надпровідну магнітну котушку для реактора керованого термоядерного синтезу у міжнародному проєкті ITER [18]. Обмотка котушки виконана зі стрічки, виготовленої з низькотемпературного надпровідного сплаву Nb—Sn. Котушка мала довжину близько 3 метрів і діаметр внутрішнього отвору 1,5 м. Магнітне поле на осі котушки становило 13 Т, а струм у обмотці досягав 46 кА. Для найбільшої обмотки ITER потрібно 870 т надпровідника, найдовший відрізок кабелю становить 1,4 км. Виготовити таку кількість надпровідного матеріалу планується сумісними зусиллями ряду країн.

Серед промислових застосувань надпровідних технологій основним є електротехнології, зокрема лінії електропередач великої потужності, використання надпровідних обмоток великої потужності у електрогенераторах та електродвигунах. Розглядаються можливості використання надпровідних магнітів для акумулювання електроенергії [12].

Обмотки потужних лазерів виділяють велику кількість теплоти з порівняно малої площі. У цьому випадку спочатку використовували кріорідини лише для охолодження, а з розвитком і здешевленням надпровідної техніки для обмоток почали використовувати надпровідні кабелі [12].

Важливим застосуванням кріотехнологій є створення надчутливої вимірювальної апаратури [13], зокрема для вимірювання напруги близько 10^{-15} В та визначення магнітних полів до 10^9 Гс (застосовують для дослідження магнітних властивостей матеріалів, у магнітокардіографії, для геомагнітних досліджень).

Для створення такого обладнання використовують контакти Джозефсона, що ґрунтуються на особливостях протікання електричного струму через шар діелектрика, розташованого між двома надпровідниками.

Контакти Джозефсона використовують також у якості швидкодіючих логічних елементів ЕОМ. Це дає змогу досягти малого часу перемикання, малих втрат потужності та великої щільності розташування.

Російським винахідником В.С.Кисельовим розроблені та запатентовані способи генерування змінного електричного струму (генератор) та обертального моменту (електродвигун) на базі надпровідних технологій [11]. Обидва способи ґрунтуються на переміщенні магнітного потоку, що проходить крізь зону провідності, створену у надпровідному статорі (р).

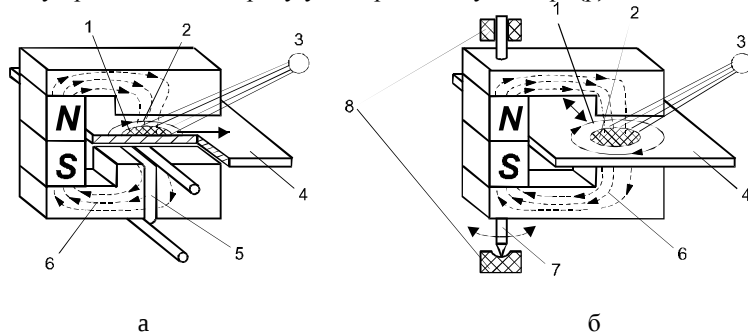


Рис. 45. Надпровідні електрогенератор (а) та електродвигун (б.).

На пластині надпровідного матеріалу 4, поміщеного у зазор магніта 6, тепловим променем 3 (наприклад, світлом інфрачервоного лазера) створюється «тепла пляма» 2, нагріта до температури вищої за температуру надпровідного переходу – утворюється зона нормальної провідності. Надпровідник має

властивості діамagnetика – він виштовхує магнітне поле до зони нормальної провідності. Коли «тепла пляма» переміщається по надпровіднику, за нею йде і магнітний потік. Він перетинає витки обмотки 5, що оточують магніт. У обмотці буде наведена електрорушійна сила і виникне електричний струм. Пристрій працюватиме як генератор.

Крім того, навколо зони надпровідності виникає коловий струм 1. Його магнітне поле взаємодіє з полем магніта, створюючи обертальний момент. І якщо магніт закріпити на вертикальній осі 7, встановлений на опорах 8, він почне обертатися під дією цього моменту, відповідно до руху надпровідної плями. Пристрій працюватиме, як двигун.

Позаяк перехід ряду матеріалів з нормального стану до надпровідного відбувається стрибкоподібно, при різниці температур у 0,001 градуса, потужність нагрівача може бути надзвичайно малою, а швидкість руху плями великою. До того ж, описаний пристрій не має рухомих частин, що робить його надійнішим.

Потужні магнітні поля, створювані за допомогою надпровідників, використані для створення магнітної левітації – за рахунок взаємного відштовхування між рухомих магнітом і струмом, що індукуються у провіднику, поїзди, розроблені у Японії та Німеччині, можуть рухатись без шуму та тертя зі швидкістю близько 300 км/год.

Розробляють і технології з високотемпературними надпровідниками [18], проте як вже зазначалося, проблемою тут є крихкість матеріалів. Для боротьби з крихкістю використовують стрічки зі сплаву на основі вісмуту. ВТНП-матеріали використовують у лабораторних магнітах та котушках підмагнічування обмежувачів струму. У Росії (МАІ, ВЕІ) розроблено ряд електричних машин з роторами, виконаними з ВТНП-кераміки та її комбінації із залізом. Для зменшення тертя використовується магнітна левітація. Двигуни працюють при температурах зрідженого азоту. Вже пройшли випробування моделі потужністю 20 та 38 кВт, ведеться робота зі створення двигуна потужністю 100 кВт.

Найактуальніша галузь використання ВТНП – потужні струмопідведення. Зокрема є проблемою підведення струму до приладів, що працюють у низькотемпературних зонах. У звичайних провідниках максимальний струм суворо обмежений тепловиділеннями (за законом Джоуля-Ленца), а у надпровідниках тепловиділення відсутні. Проте у цьому випадку виникають інші обмеження, пов'язані з областю робочих температур, зовнішніми магнітними полями та силою струму.

Стрічкові ВТНП використані у США для струмопідведення у 13 кА для Великого адронного колайдера у Центрі ядерних досліджень. У ньому використано близько 8 тисяч надпровідних магнітів з низькотемпературних надпровідників, що працюють при температурі близько 4К. За таких умов теплопідведення до низькотемпературної зони не перевищує 80 мВт.

11.5. Кріотехнології у харчовій та фармацевтичній промисловості

У харчовій промисловості використовують безмашинні системи надшвидкого заморожування продуктів, у яких використовується твердий CO₂ чи зріджений азот. Найкращі результати отримані для продуктів невеликого розміру, що містять багато води – фруктів, ягід, креветок та інших морепродуктів – хоча кріогенні апарати також успішно використовуються у багатьох країнах для заморожування риби, м'ясних напівфабрикатів та фаршу.

Продукт заморожують до -18..20°C, рідше до -25...30°C, інколи до -196°C. Задача надшвидкого заморожування полягає у тому, щоб найшвидше пройти область максимального кристалоутворення (-1...-5°C) для уникнення руйнування клітин. Кріогенні скороморозильні апарати дають значно вищу швидкість заморожування ніж традиційні холодильні машини [8].

Орієнтовна швидкість заморожування для різних способів

Спосіб заморожування	Швидкість заморожування, см/с
Холодильні машини, камери з нерухомим повітрям	0,15
Холодильні машини, камери з примусовою циркуляцією повітря	1,15
Холодильні машини, заморожування у вихоровому потоці повітря	4,80
Зрошення зрідженим азотом	12
Занурення у зріджений азот	120

Загалом кріогенні скороморозильні апарати можна поділити на зрошувальні та занурювальні (імерсійні). Під час занурення продукту до зрідженого азоту коефіцієнт тепловіддачі значно вищий, проте істотним недоліком імерсійного заморожування є значний температурний перепад між поверхнею та центром продукту, що виникає при цьому. Через це створюється внутрішня напруга, що призводить до руйнування структури продукту. До того ж, імерсійне заморожування потребує більшої витрати зрідженого азоту (близько 2 кг/кг продукту) ніж зрошувальне (близько 1 кг/кг продукту). Саме тому більш поширені зрошувальні або комбіновані системи заморожування. У окремих випадках використовують апарати, у яких продукт заморожується парою зрідженого азоту, не контактуючи з рідиною.

Кріогенні морозильні апарати можуть бути періодичної чи безперервної дії. В апаратах періодичної дії порції продукту зрошуються кріорідиною протягом певного часу. В установках безперервної дії тунельного типу (рис. 46) продукт на транспортері спочатку контактує з парою кріорідини, відбувається попереднє охолодження (зона I), потім зрошується кріорідиною (зона II), а на останній стадії відбувається вирівнювання температур за об'ємом (зона III). Такі установки є економічнішими, порівняно з установками періодичної дії, бо після виходу на режим не потребують додаткових витрат кріорідини на

захолодження камери. До того ж, для попереднього охолодження використовується пара кріорідини, що підвищує питому холодопродуктивність кріорідини і зменшує потребу у ній.

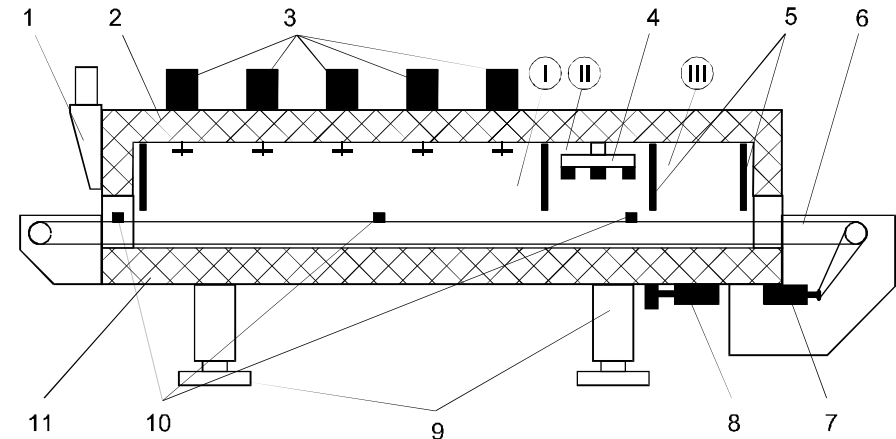


Рис. 46. Принципова схема кріогенного скороморозильного апарата (I – зона попереднього охолодження паром азоту; II – зона зрошування зрідженим азотом; III – зона вирівнювання температур; 1 – система відведення відпрацьованої пари; 2 – теплоізований короб; 3 – циркуляційні вентилятори; 4 – колектор зрідженого азоту з форсунками; 5 – гнучкі холодостійкі шторки; 6 – стрічковий сітчастий конвеєр; 7 – привод конвеєра; 8 – привод піднімання теплоізованого короба; 9 – опори; 10 – датчик температури; 11 – металева несуча рама з теплоізоляційною плитою).

Привод сітчастого конвеєра дає змогу плавно регулювати швидкість його руху. Заморожування продукту здійснюється за рахунок зрошування зрідженим азотом через систему форсунок до робочого об'єму зони II, після чого пара азоту подається до зони I за допомогою циркуляційних вентиляторів, а також до зони III. Відведення відпрацьованої пари здійснюється через систему вентиляційних коробів, встановлених з боку входу продукту. Живлення апарата зрідженим азотом здійснюють з кріорезервуара.

У інших конструкціях апаратів продукт спочатку занурювався у ванну зі зрідженим азотом, а потім доморожувався на транспортері охолодженим азотом. Проте така конструкція не надто поширилася, бо значна частина продуктів руйнувалася під дією внутрішнього тиску.

Існують установки з відновленням (повторним використанням азоту – газ, що утворився у камері відсмоктується вентилятором, очищується від домішок та подається на зріджувальну установку. Зріджений азот зберігається у танку, який за потреби поповнюють із зовнішніх джерел.

Заморожування з використанням зрідженого азоту порівняно з використанням парокомпресійних холодильних машин має ряд переваг:

- нижчі капітальні затрати до 50% (без урахування капітальних затрат на будівництво газороздільної станції);
- висока продуктивність, що легко може регулюватися у 3-5 разів – це дає гнучкість виробництва, особливо потрібну для малих підприємств;
- триває у 4-5 разів швидше (до -20°C малина заморожується за 20 с, полуниця – за 40 с);
- втрати продукту у 2-3 рази менші за рахунок швидкого утворення льодяної кірки на поверхні (зменшує всихання) і зменшення витікання клітинного соку під час дефростації;
- азот насичує поверхневі шари продукту, вповільнюючи його окислення;
- не руйнується структура клітин, тому практично відсутнє витікання клітинного соку після розморожування, отже максимально зберігаються всі поживні речовини та вітаміни. Так м'ясо, дефростоване після замороження у зрідженому азоті на центрифугі втрачало 27,6% рідини (свіже – 26,9%) тоді як дефростоване після заморожування у тунельному швидкозаморозильному апараті при -18 °C – близько 33%;
- заохолодження апаратів триває 20-30 хв. (тунельні апарати з парокомпресійними машинами заохолоджуються протягом кількох годин);
- відсутність потреби у значній кількості електроенергії на місці заморожування – це дає змогу організувати заморожування свіжих продуктів безпосередньо за місцем їх вирощування чи вилову, максимально зберігши харчову цінність;
- простота конструкції, а отже підвищена надійність, мала кількість обслуговуючого персоналу;
- займають у 6-8 разів меншу площу;
- легко автоматизуються.

Сублімаційне висушування продуктів [8, 9] використовують тоді, коли потрібно видалити з продукту воду при мінімальному його нагріванні і максимальному збереженні структури. Продукт розміщують на полицях субліматора з температурою від -40 до +40 °C. Плита десубліматора (на ній відбувається виділення льодяних кристалів) має температуру -40...-80°C (охолодження може здійснюватися за допомогою каскадної холодильної машини чи кріорідин). У камері підтримується вакуум (абсолютний тиск до 40 Па). Волога при цьому видаляється у процесі сублімації – перетворення льоду на пару. Відсутність рідкої фракції та низькі температури унеможливають життєдіяльність мікроорганізмів та біохімічні перетворення в продукті. Тому сублімаційне висушування дозволяє зберегти більше біологічно активних речовин та вітамінів порівняно з тепловим. Сублімаційне висушування

використовується і в фармацевтичній промисловості – наднизькі температури дозволяють у повній мірі зберегти властивості препаратів, біологічно активних добавок тощо.

За наднизьких температур заморожені продукти стають крихкими. Ця властивість використовується для кріоподрібнення. Невеликі зусилля стискання дозволяють отримати дрібнодисперсний порошок. Таким чином отримують сухі порошки з фруктів та овочів, що зберігають практично всі поживні речовини плодів і використовуються для виготовлення молочних продуктів, напоїв, харчових концентратів тощо. Створено системи кріоподрібнення пластичних харчових продуктів (порошок з частками розміром до 1 мм). Кріоподрібнення здійснюють на вібромлинах або на молоткових млинах після охолодження (заморожування) продукту до 265 К з використанням вприскування зрідженого азоту [8]. Також застосовують кріоподрібнення желатину з діаметром часток понад 0,35 мм на порошок дисперсністю до 0,15 мм з метою кращого гелеутворення. Для цього використовують попереднє охолодження зрідженим азотом до 173 К. Витрата зрідженого азоту на системи кріоподрібнення становить 0,5...5 кг/кг продукту, вартість подрібнення продукту – від 35 до 200 доларів за тону.

Кріогрануляція вкупі з сублімаційним висушуванням дозволяє отримати з рідких пастоподібних чи пюреподібних матеріалів гранули (наприклад для харчоконцентратної промисловості). Типова технологія передбачає розпилювання матеріалу з форсунки у атмосфері охолодженого повітря або азоту (температури 80...120 К). Краплі матеріалу замерзають у польоті у вигляді гранул чи порошку, залежно від тонкості розпилення. Отримані гранули чи порошок надходять у вакуум-камеру для сублімаційного висушування. Проблема цієї технології є те, що утворені гранули мають різний розмір, а отже важко підібрати для них режим сублімаційного висушування. Крім того, надто дрібні фракції порошку під час висушування виносяться з камери, забиваючи фільтр, що призводить до втрат матеріалу та підвищення витрати енергії. Вирішенням цієї проблеми є заморожування у кріорідинах з використанням краплегенератора [8]. Краплегенератор – це система капілярів, що за сталої швидкості витікання забезпечують утворення крапель сталої діаметру.

Кріогранулятор (рис. 47) являє собою похилий теплоізолюваний жолоб прямокутного перерізу 1 з перегородками, що упорядковують рух крапель продукту. Зріджений азот з посудини Дьюара 10 витісняється газоподібним азотом, що утворюється за рахунок роботи електронагрівача змінної потужності 9, і трубопроводом 12 подається у накопичувач 13, звідки через регулювальний вентиль 11 подається у жолоб. Змінна потужність нагрівача дає змогу підтримувати рівень зрідженого азоту у накопичувачі сталим. Продукт надходить трубопроводом 14 до краплегенератора 15 зі збірника 6, у якому підтримується сталий тиск за допомогою стисненого азоту 7, що надходить з ресивера, тиск у якому підтримується компресором. Краплегенератор

виведений за межі охолоджуваного контуру – це необхідно для того, щоб у його капілярах не замерзав продукт. У краплегенераторі утворюються краплі однакового розміру, що падають у жолоб на поверхню зрідженого азоту, зберігаючи при цьому кулеподібну форму за рахунок сил поверхневого натягу. При контакті теплої краплі зі зрідженим азотом крапля швидко заморожується, а азот одразу випаровується, утворюючи газовий прошарок між краплею та шаром рідини у жолобі. Завдяки цьому прошарку, незважаючи на вищу густину краплі (близько 1000 кг/м^3) порівняно зі зрідженим азотом (близько 800 кг/м^3) крапля не тоне. Таким чином, замороження краплі триває на поверхні зрідженого азоту під час руху жолобом. У нижній частині жолоба встановлена сітка-сепаратор 5 для відділення гранул замороженого продукту. Залишки зрідженого азоту стікають у посудину Дьюара 4 і можуть використовуватися повторно. Випарений холодний газоподібний азот відводиться з камери і може бути використаний зокрема для охолодження камери зберігання гранул.

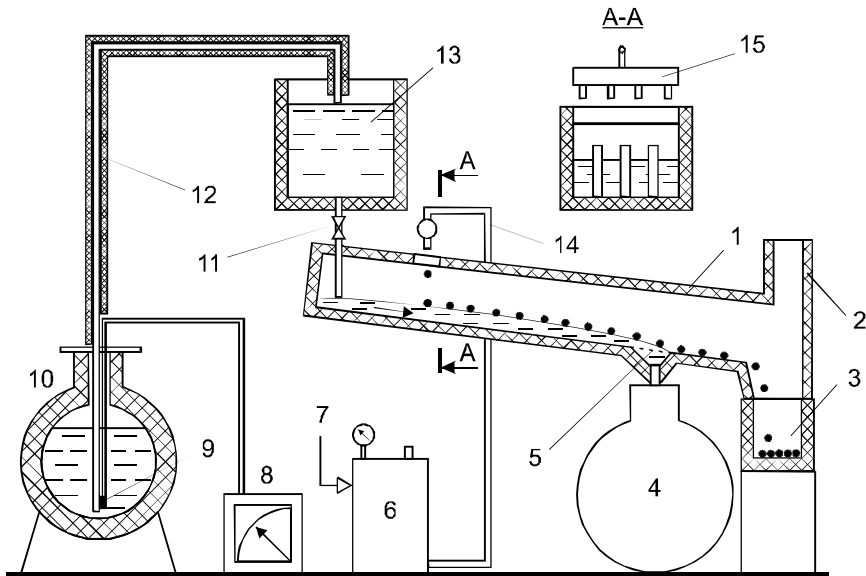


Рис.47. Криогранулятор (1 – теплоізований корпус; 2 – відведення газоподібного азоту; 3 – збірник продукту; 4, 10 – посудина Дьюара; 5 – сітка-сепаратор; 6 – збірник рідкого продукту; 7 – подавання стисненого азоту з ресивера; 8 – трансформатор; 9 – електронагрівач; 11 – регулювальний вентиль зрідженого азоту; 12 – трубопровід зрідженого азоту; 13 – накопичувач зрідженого азоту; 14 – трубопровід продукту; 15 – краплегенератор;)

11.6. Кріотехнології у інших галузях

Кріотехнології широко використовуються також у інших галузях. Зокрема під час виготовлення виробів методом відливання з пластмас, для зменшення маси виробів, витрати пластмаси та прискорення заходження відливок використовують ін'єкції газу (найчастіше охолодженого азоту). За технологією “Kool Gas” азот охолоджують у кріогенному теплообміннику до 120 K, після чого вводять у пластмасу. Така технологія прискорює затверднення виробів на 40%, причому не виникають дефекти і точніше дотримується товщина стінок виробів.

Особливо цінними кріорідини є у системах охолодження мікросхем, коли площа поверхні теплообміну не може бути великою, а отже потрібний великий коефіцієнт тепловіддачі (важко здійснюється) та велика різниця температур між об'єктом охолодження та охолодним середовищем. Зокрема швидкодіючі процесори виділяють велику кількість теплоти. Водночас їх температура не повинна підніматися понад встановлені значення ($20^{\circ}\text{C} \dots 40^{\circ}\text{C}$). До того ж, ставиться вимога щодо зменшення розмірів процесора, а отже до зменшення доступної площі поверхні охолодження. Тому на потужних комп'ютерах замість традиційних вентиляторів-кулерів використовують охолодження за допомогою азотних чи неонових кріорефрижераторів з температурами кипіння близько 50 K. На менш потужних процесорах можливе використання малих фреонових холодильних машин з температурами кипіння $0^{\circ}\text{C} \dots -30^{\circ}\text{C}$.

Кріоподрібнення, про яке писалося раніше, успішно використовують і для переробки відходів. Найяскравішим прикладом є перероблення використаних автомобільних шин з металевим кордом [7]. Розділення корду та гуми було проблемою, тому раніше шини просто спалювали або закопували у ґрунт, наносячи значну шкоду довкіллю. При охолодженні до кріогенних температур гума стає крихкою і при стисненні під час проходження крізь валки руйнується. Крихти гуми, що мають рівну поверхню, та сталевий корд розділяються на ситі. Сталевий корд використовується як металобрухт, а гумова крихта є цінною сировиною для будівництва кортів, бігових доріжок, дорожнього покриття тощо. Гумова крихта також може бути використана як додаток до гуми під час вироблення гумових виробів (покришок, шлангів, килимків, підошов, покриття для дахів та ін.). При такому способі утилізації відсутні шкідливі викиди у довкілля. Основною продукцією заводів з переробки автомобільних шин є високоякісна гумова крихта, високоякісний метал (корд), текстиль. Побічною продукцією є кисень та аргон, що утворюються внаслідок розділення повітря.

Для охолодження кузовів транспортних засобів використовують азотну систему охолодження [17], що ґрунтується на розбризкуванні зрідженого азоту через форсунки безпосередньо до кузова. Тривалість заходження кузова при цьому становить близько 10 хв., що важливо для збереження температурного режиму у випадку частого відкривання та закривання дверей (наприклад під час розвезення морожених продуктів по багатьох магазинах торгівельної мережі). Температура підтримується за допомогою реле

температури, що відкриває та закриває соленоїдний вентиль подавання азоту з посудини Дьюара на форсунки. Така система дає змогу підтримувати температуру у охолоджуваному об'ємі з точністю до 1°C. Її недоліком є необхідність провітрювання кузова перед тим як до нього заходити (вміст азоту може сягати 99%). Крім того, у разі поширення такої системи виникне потреба у створенні мережі станцій заправлення транспорту зрідженим азотом.

ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ЗАЛІКУ

1. Що вивчає кріогенна техніка? У чому полягає її відмінність від холодильної техніки.
2. Опишіть процес адіабатного розширення газу, наведіть рівняння та побудуйте його у $T-s$ -діаграмі. Чому відбувається зниження температури?
3. Опишіть ефект Джоуля – Томсона. Наведіть рівняння ізоентальпійного дроселювання. Побудуйте цей процес у $i-s$ -діаграмі та у $T-s$ -діаграмі.
4. Опишіть процес адіабатного розмагнічування парамагнетика. Чому саме цей процес найчастіше використовують для одержання наднизьких температур (до 2 K)?
5. У який спосіб отримують кріогенні температури окрім адіабатного розширення дроселювання та розмагнічування?
6. Опишіть ідеальні системи термостатування, охолодження, конденсації (зрідження) та кристалізації. Якими показниками характеризується термодинамічна ефективність систем зрідження газів та компонентів цих систем?
7. Накресліть схему та цикл ідеальної системи зрідження газу? Як знайти питомі витрати роботи в цій системі?
8. Чому реальні системи зрідження менш ефективні ніж ідеальна? Опишіть втрати, що виникають у реальних системах зрідження.
9. Як змінюються механічні властивості конструкційних матеріалів за кріогенних температур?
10. Як змінюються теплофізичні властивості конструкційних матеріалів за кріогенних температур? Що таке електронна та магнітна теплоємності? Що таке електронна та фононна теплопровідності?
11. Як змінюється електрична провідність матеріалів за кріогенних температур?
12. Що таке надпровідність? Наведіть основні положення теорії БКШ?
13. Що таке надпровідники 1-го та 2-го роду?
14. Що таке ефект Мейснера? Як він застосовується у техніці?
15. Що таке високотемпературна надпровідність? У чому полягають особливості її використання?
16. Опишіть властивості зріджених азоту та кисню.
17. Опишіть зріджений водень та основні його властивості. Що таке орто-пара-перехід?
18. Опишіть зріджений гелій та основні його властивості. Що таке надплинний стан зрідженого гелію та у чому його особливості?
19. Накресліть та охарактеризуйте схему та цикл простої системи зрідження газів з одноразовим дроселюванням (система Лінде – Хемпсона). Як визначити питому витрату роботи на зрідження, ексергетичний ККД та вихід зрідженого газу для цієї системи?
20. Накресліть та охарактеризуйте схему та цикл системи зрідження газів з одноразовим дроселюванням та попереднім охолодженням. Як визначити

питому витрату роботи на зрідження, ексергетичний ККД та вихід зрідженого газу для цієї системи?

21. Накресліть та охарактеризуйте схему та цикл системи зрідження газів з подвійним дроселюванням. У чому її переваги над системою з одноразовим дроселюванням? Як визначити питому витрату роботи на зрідження, ексергетичний ККД та вихід зрідженого газу для цієї системи?

22. Накресліть та охарактеризуйте схему та цикл каскадної системи зрідження газів. У чому її переваги над іншими системами зрідження?

23. Накресліть та охарактеризуйте схему та цикл детандерної системи зрідження газів. У чому її переваги над іншими системами зрідження? Як визначити питому витрату роботи на зрідження, ексергетичний ККД та вихід зрідженого газу для цієї системи?

24. Охарактеризуйте схеми систем зрідження газів Капіці та Гейландта. У чому їх переваги над системою Клода?

25. З яких причин проста система з одноразовим дроселюванням не працюватиме для водню, гелію та неону?

26. Накресліть та охарактеризуйте схему системи зрідження водню Лінде – Хемпсона з попереднім охолодженням рідким азотом. Як визначити питому витрату роботи на зрідження, ексергетичний ККД та вихід зрідженого газу для цієї системи?

27. Накресліть та охарактеризуйте схему системи зрідження водню з гелієвим рефрижератором.

28. Наведіть схему системи зрідження гелію Коллінза.

29. Наведіть схему системи зрідження гелію Саймона та опишіть процес її роботи.

30. Опишіть конструкції теплообмінників, використовуваних у кріогенних системах (змійовикові, пластинчасто-ребристі та ін.).

31. Які типи компресорів та детандерів використовуються у кріогенних системах? Які втрати роботи спостерігаються під час роботи поршневих компресорів та детандерів? Які втрати роботи спостерігаються під час роботи турбокомпресорів та турбодетандерів?

32. Як впливають ККД компресора, детандера, ефективність теплообмінників та теплонаходження з довкілля на показники ефективності системи зрідження?

33. Опишіть склад зрідженого повітря.

34. Яка різниця між зеотропною та азеотропною сумішшю? Опишіть процеси конденсації та кипіння зеотропної суміші азоту та кисню.

35. Як визначити питому роботу на розділення газової суміші для ідеальної системи?

36. Що таке ректифікація? У чому її перевага перед простим випаровуванням та конденсацією?

37. Накресліть схему ректифікаційної колони та опишіть процеси, що відбуваються у ній.

38. Наведіть схеми систем розділення повітря Лінде з одно- та дворазовою ректифікацією. У чому переваги дворазової ректифікації над одноразовою?

39. Наведіть схему системи розділення повітря Лінде-Франкла.

40. Наведіть та охарактеризуйте схеми розділення повітря з вилученням аргону та інертних газів. З якою метою вилучають ці гази?

41. Охарактеризуйте способи очищення газів?

42. Опишіть конструкцію посудини Дьюара та її окремих елементів (зовнішня та внутрішня оболонки, підвіски, трубопроводи).

43. Які види теплоізоляційних конструкцій використовують у кріорезервуарах? Вкажіть переваги та недоліки кожного виду.

44. Опишіть теплоізоляційні конструкції кріотрубопроводів. У яких випадках використовують неізольовані кріотрубопроводи?

45. У чому полягають особливості арматури кріотрубопроводів? Що таке заходження кріотрубопровода?

46. Що таке кріорефрижератор? У яких випадках їх застосовують? Наведіть схему та опишіть принцип дії кріорефрижератора Лінде.

47. Наведіть схему та опишіть принцип дії кріорефрижератора Філіпса.

48. Наведіть схему та опишіть принцип дії кріорефрижератора Вюлем'є-Таконіса.

49. Наведіть схему та опишіть принцип дії кріорефрижератора Гіффорда-Мак-Магона. Для чого його використовують?

50. Опишіть систему магнітного охолодження Даунта та наведіть її схему.

51. Що таке рефрижератор розчинення? Опишіть принцип роботи рефрижератора розчинення на суміші ^3He та ^4He .

52. Опишіть схему та порядок роботи універсальної кисневидобувної станції СКДС.

53. З якою метою та у який спосіб зріджують природний газ?

54. Як використовуються кріогенні технології у біології та медицині? Що таке кріотерапія та кріодеструкція?

55. Опишіть сфери застосування кріогенних систем у лазерній техніці, радіоелектроніці та комп'ютерній техніці.

56. Які перспективи використання кріорідини у авіації та космонавтиці?

57. Як використовують надпровідні технології у електротехніці?

58. Опишіть конструкцію та принцип роботи безмашинних систем заморожування харчових продуктів. У чому їх переваги та недоліки порівняно з холодильними машинами?

59. Як здійснюють сублімаційне висушування? Які переваги воно має перед тепловим?

60. Як і для чого здійснюють кріоподрібнення харчових продуктів?

61. Для чого використовують кріогрануляцію? Опишіть схему кріогранулятора.

62. Як використовують кріотехнології у радіоелектроніці, на транспорті, у системах переробки відходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ДО КУРСУ

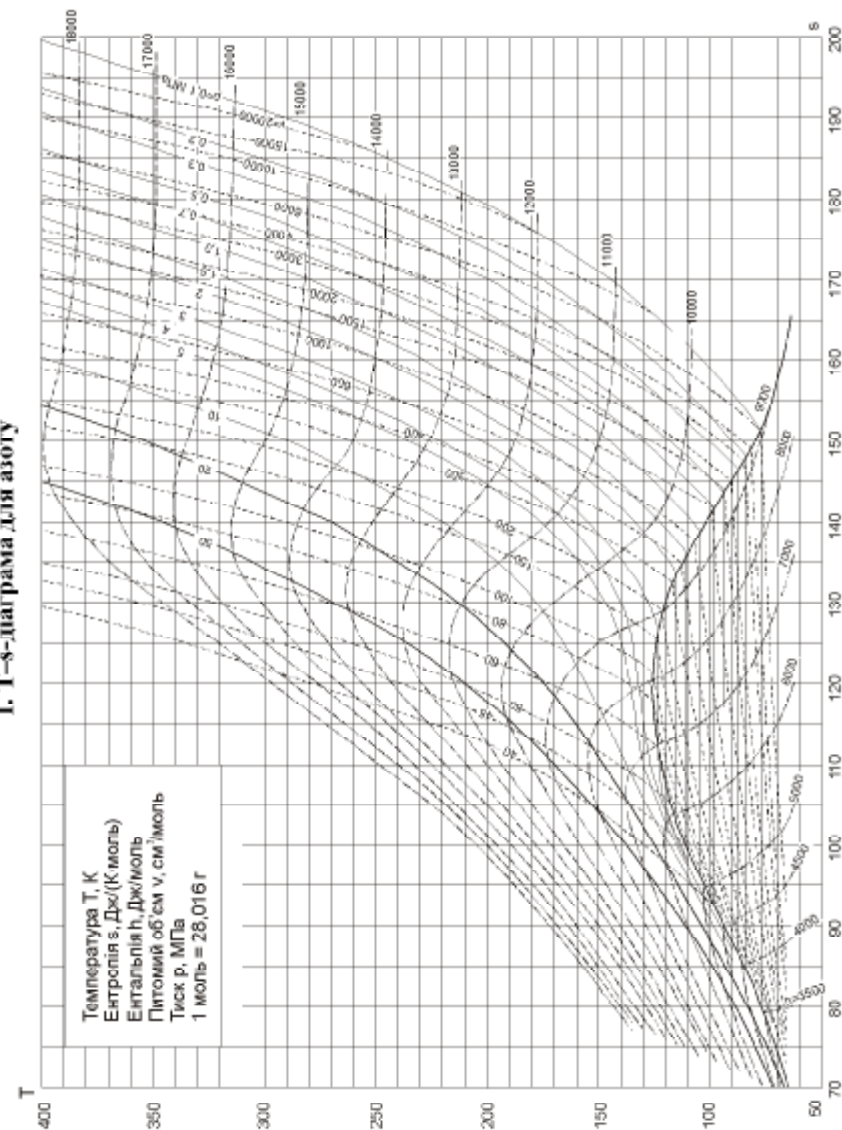
Основна

1. Беляков В.П. Криогенная техника и технология.— М.: Энергоиздат, 1982.
2. Бродянский В.М. Семенов А.М., Термодинамические основы низкотемпературной техники.—М.: Энергия, 1980.
3. Григорьев В.А., Крохин Ю.И. Тепломассообменные аппараты криогенной техники.— М.: Энергоиздат, 1982.
4. Криогенные системы /А.М.Архаров , В.П. Беляков , Е.И.Микулин и др. — М.: Машиностроение, 1987.

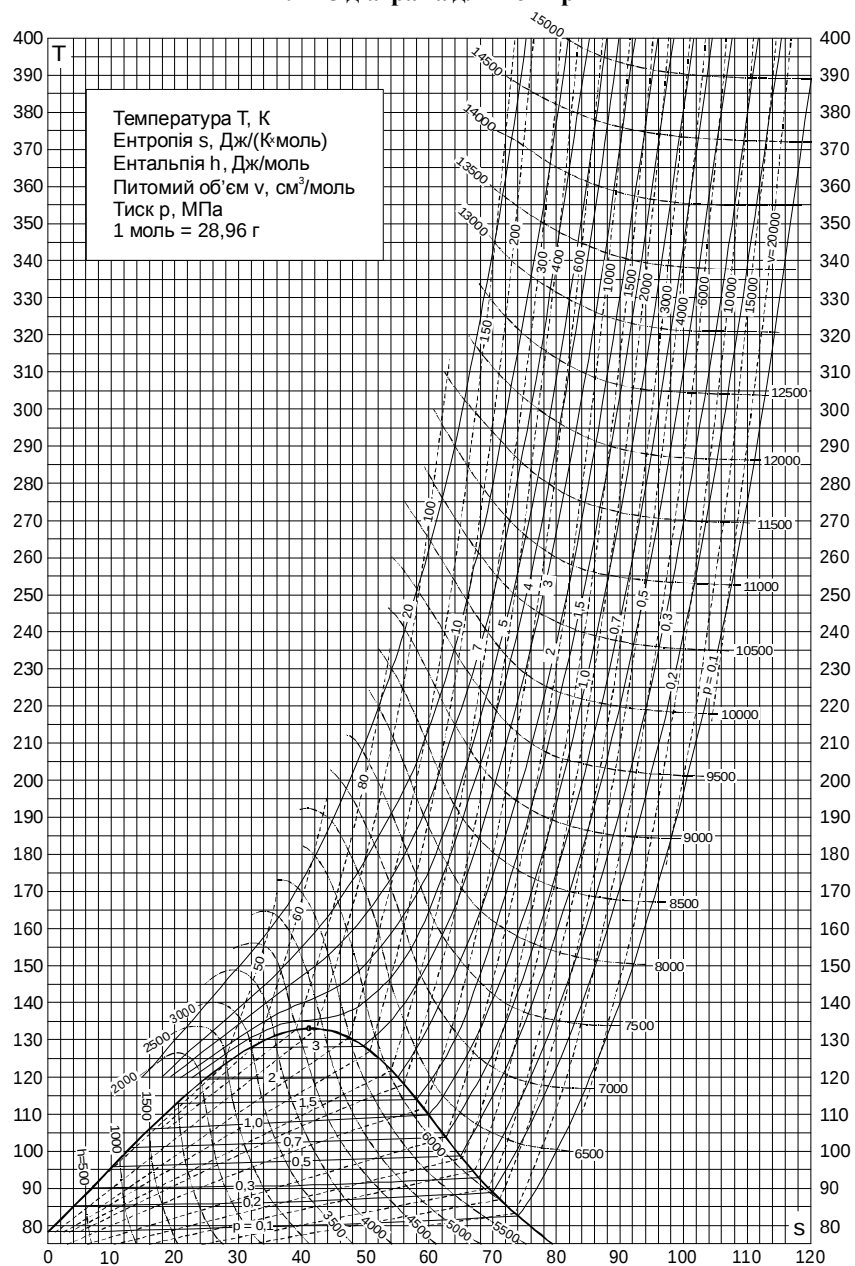
Додаткова

5. Баррон Р.Ф. Криогенные системы. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Дашков С. А.. Что может холод.— Наука и жизнь.— № 2, 2004.— с.138.
7. Завод по переработке старых автомобильных шин криогенным способом на основе производства собственного, дешевого азота. INTERENERGO RESURS Ltd.— www.sciteclibrary.com.
8. Илюхин В.В. Физико-технические основы криоразделения пищевых продуктов.— М.: Агропромиздат, 1990.—208 с.
9. Новые технологии витаминных углеводсодержащих фитодобавок и их использование в продуктах профилактического действия / Р.Ю. Павлюк, А.И. Черевко, И.С. Гулый и др.— Х. — К.:1997.
10. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование. В 2-х тт. Под ред. В.И.Епифановой и Л.С.Аксельрода.— М.: Машиностроение, 1973.
11. Транковский. С. Генератор на сверхпроводимости.— Наука и жизнь.— № 2, 2004.— с.142.
12. Транковский С. Сверхпроводимость и сверхтекучесть.— Наука и жизнь.— № 2, 2004.— с.155.
13. Сверхпроводимость.— <http://www.krugosvet.ru/articles/23/1002326/1002326a1.htm>
14. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П.Малкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
15. Филатов А. Водородная авиация. SciTechLibrary.com (<http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/3830.html>)
16. Физика низких температур.— <http://www.krugosvet.ru/articles/13/1001321/1001321a1.htm>
17. Пуранов О.А., Крысин А.Г. Холодильная техника и технология.— СПб: Лидер, 2004.
18. Ширшов Л.С. Школа по прикладной сверхпроводимости на исходе века.— <http://dbserv.ihep.su/~pubs/about/arch99-w.htm>

ДОДАТКИ
I. Т- ϕ -діаграма для азоту

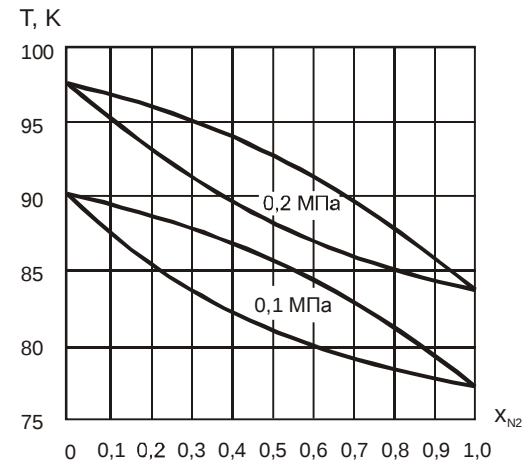


2. T-s-діаграма для повітря

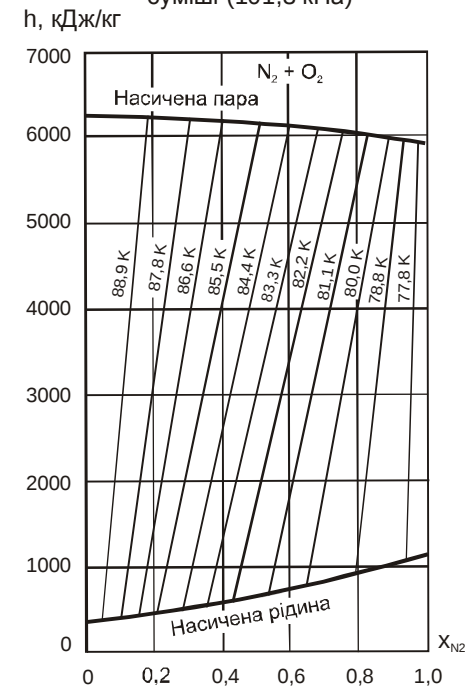


3. Діаграми стану азотно-кисневої суміші

Діаграма T-x для азотно-кисневої суміші



Діаграма h-x для азотно-кисневої суміші (101,3 кПа)



4. Технічні характеристики станції СКДС-100М2

Продуктивність:	
за рідким киснем чи азотом, кг/год	70 5
за газоподібним киснем, м ³ /год	62
за газоподібним азотом, м ³ /год	80
за газоподібним очищеним повітрям (при Р=200 кгс/см ²), нм ³ /год	100
Чистота продуктів залежно від режиму, %:	
рідких	99,0 - 99,2
газоподібних	99,0
Тиск газоподібних продуктів, МПа, (кгс/см ²)	
рідких	0,07 (0,7)
газоподібних	40 (400)
Тривалість :	
монтажу та підготовки до пуску, діб	16-18
пуску, год.	5
відігрівання, год.	6
Споживана потужність, КВт	190-200
Маса, т	14
Кількість 40-літрових балонів до Р=15 МПа (150 кгс/см ²), що заправляються за 1 добу, шт.	
киснем	216
азотом	336
Строк служби до списання, років	20

Навчальне видання

Кріогенна техніка та технологія

Курс лекцій

для студентів спеціальності 6.090500
«Холодильні машини і установки»
денної та заочної форм навчання

Укладач Масліков Максим Михайлович

Підп. до друку . Наклад 100 пр. Вид. № . Зам. №
РВЦ НУХТ. 01033, Київ – 33, вул. Володимирська, 68
www.book.nuft.edu.ua
Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1786 від 18.05.04 р.