МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Львівський національний університет імені Івана Франка

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу
"ФІЗИКА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР"

для студентів фізичного факультету.

Львів-2018

Рекомендовано до друку
Вченою радою фізичного факультету львівського національного університету
імені Івана Франка від 23 травні 2018 року, протокол № 4

Уклав :
Юрій Ігорович Еліяшевський

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу
"ФІЗИКА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР"

для студентів фізичного факультету.

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська, м. Львів, 79000
Свідоцтво про внесення об’єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів друкованої продукції.
Серія ДК №3059 від 13.12.2007 р.

Формат 60x84/16. Папір друк. Друк на різограф. Гарнітура Times New Roman.
тираж 100 прим.

Видавничий центр фізичного факультету ЛНУ імені Івана Франка
79005 м. Львів , вул. Кирила і Мефодія, 8

Лабораторна робота 1

ВИВЧЕННЯ ТЕХНІКИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОГО ВАКУУМУ.

Мета роботи. Вивчити принципи роботи, конструкцію та особливості використання дифузійного та турбомолекулярного насосів,о тримати навики відкачки кріостатів перед низькотемпературними дослідженнями.

Прилади та матеріали: дифузійний паромасляний насос Вакма Н 100/350, турбо-молекулярний насос Pfeiffer Hi-Pace 80, вимірювачі вакууму.

Теоретичні відомості

Отримання низьких температур тісно пов'язане з теплоізоляцією від припливу тепла із зовнішнього середовища. Один з методів теплоізоляції - розміщення робочої частини кріостату в вакуумній камері. Для отримання вакууму використовують вакуумні насоси, що різняться як за принципом дії, так і за можливістю отримувати вакуум різного ступеня. Існуючі насоси можна поділити на механічні та фізико-хімічні. Розглянемо докладніше механічний тип вакуумних насосів.

Механічні насоси

За характером впливу на відкачувані гази механічні насоси поділяються на *об'ємні* і *молекулярні.* Об'ємні насоси здійснюють відкачування за рахунок періодичної зміни об'єму робочої камери. В процесі об'ємного відкачування виконуються наступні операції:

1) всмоктування газу за рахунок розширення робочої камери насоса,
2) зменшення об'єму робочої камери і стиснення газу, що в ній знаходиться,
3) видалення стиснутого газу з робочої камери в атмосферу або у насос попереднього розрідження.

Залежно від вибору конструктивної схеми об'ємні насоси діляться на поршневі, рідинно-кільцеві і ротаційні, діафрагмальні.

Ротаційні насоси

Типовим прикладом ротаційного насосу є пластинчасто-роторний насос, що зображений на рис.1.1

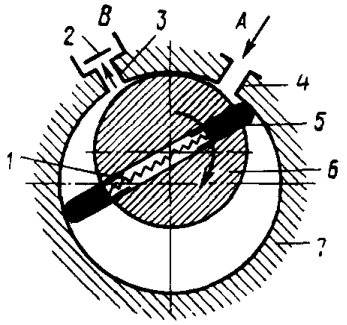

Рис. 1.1 Пластинчасто-роторний насос.

Пластинчато-роторний насос, складається з циліндричного корпусу 7 з впускним 4 і випускним 3 патрубками та ексцентрично розташованого ротора 6, в пазах якого встановлені пластини 5. Під дією відцентрової сили пластини притискаються до корпусу, забезпечуючи зміну об'єму робочої камери. Для запобігання перетікання газу в зворотному напрямі здійснюється ущільнення зазорів з допомогою вакуумного масла. Граничний тиск такого насоса визначається газовиділенням конструктивних матеріалів, об'ємом шкідливого простору і тиском насичених парів масла. Граничний тиск одноступінчатих роторних насосів складає 1 Па, двоступеневих - 0,001 Па.

Пластинчато-статорний насос складається з наступних елементів: корпуса 1, ексцентричного ротора 2, випускного патрубка 3, пластини 5, пружини 4, вхідного патрубка 6, (Рис. 1.2). При обертанні за годинниковою стрілкою за перший оберт ротора виконується всмоктування газу.

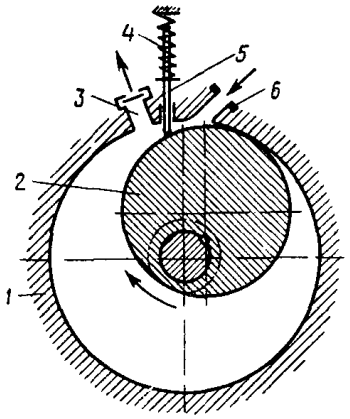

Рис. 1.2 Пластинчасто-статорний насос

Пластина під дією пружини герметично розділяє об'єми всмоктування і стиснення відкачуваного газу.

Для роботи з великою швидкодією при малих ступенях стиснення застосовують ротаційні вакуумні насоси з профілями, що взаємно перекриваються. Обертання роторів здійснюється через механічну передачу, що синхронізує фази обертання рухомих елементів. До таких насосів відносяться **двороторні насоси (насоси Рутса),** що мають ротори з лемніскатними профілями. (Рис. 1.3)

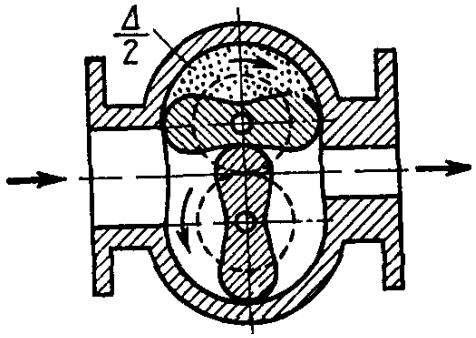

Рис. 1.3 Насос Рутса.

За один оберт кожен з роторів двічі перекидає об'єм газу з області високого вакууму в область попереднього розрідження (див. Рис 1.3, затінена область). Двороторні насоси при подібних габаритах мають значно більшу швидкість відкачування, ніж інші типи ротаційних насосів. Швидкість дії сучасних двороторних насосів лежить в межах від 5 до 5000 л / с. Ліміт тиску одноступеневих насосів 0,5 Па, двоступеневих - 0,05 Па.

Молекулярні насоси

Молекулярні насоси працюють за рахунок передачі молекулам газу імпульсу від твердої, рідкої або пароподібної поверхні, котра рухається із великою швидкістю.

Серед них розрізняють водоструминні, ежекторні, дифузійні насоси. Молекулярні насоси можуть мати однаковий напрям руху поверхні, що здійснює відкачування молекул і потоку газу, та турбомолекулярні - із взаємно перпендикулярним рухом твердих поверхонь і відкачуваного газу.

На Рис. 1.4 зображено основні конструктивні елементи вакуумного насосу з поверхнею, що рухається паралельно потоку відкачуваного газу. Відкачування проходить через канал, одна зі стінок якого здійснює переміщення зі швидкістю v_p паралельно осі каналу

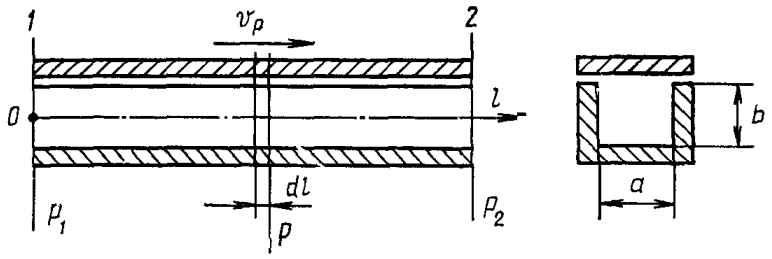

Рис 1.4 .Схема турбомолекулярного насоса паралельної дії.

Молекули газу в каналі здійснюють зіткнення з рухомою поверхнею каналу, отримуючи приріст імпульсу. При цьому створюється різниця тисків: $P_2 > P_1$. Максимальна швидкість дії пропорційна швидкості стінки v_p:

$$S_{max} = \gamma F_к v_p, \tag{1.1}$$

де $F_к$ – площа поперечного перерізу каналу відкачування; γ – частка молекул, що постійно отримують приріст швидкості

$$\gamma = f_д/(f_д + f_н) \tag{1.2}$$

Тут $f_д$ – лінійний розмір рухомої частини периметра каналу, $f_н$ – лінійний розмір нерухомої частини периметра каналу.

Номінальна швидкість дії такого насосу:

$$S_f = S_{\max} \frac{\frac{P_2}{P_1} - \ell^{\frac{S_{\max}}{U_K}}}{1 - \ell^{\frac{S_{\max}}{U_K}}} \tag{1.3}$$

де U_k – провідність каналу відкачування

У молекулярних насосів із взаємно перпендикулярним рухом твердих поверхонь і відкачуваного газу використовується залежність провідності похилого каналу, що рухається перпендикулярно газовому потоку зі швидкістю v_p, від напрямку течії газу (Рис. 1.5). Нехай пластину з похилим каналом з обох сторін перпендикулярно до поверхні пластини бомбардують потоки молекул газу q_1 і q_2. Уявно зупинивши пластину і додавши вектор відносної швидкості молекул v_p із векторами теплових швидкостей молекул v_{ap},отримаємо змінений напрямок руху молекул. При цьому, потік q_1 входить паралельно, а потік q_2 перпендикулярно осі каналу. Це призводить до того, що провідності каналу для потоків q_1 і q_2 будуть різні.

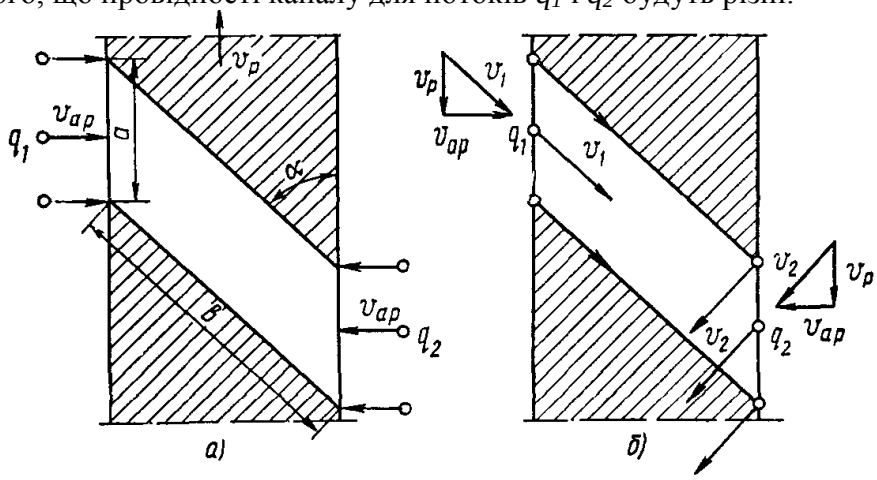

Рис. 1.5. Принцип дії турбомолекулярних насосів із взаємно перпендикулярним рухом твердих поверхонь і відкачуваного газу.

Для сталого режиму течії газу:

$$Q = S_н P1 = U_{12}P_1 - U_{21}P_2$$

де U_{12} і U_{21} - провідності каналу для потоків q_1 і q_2 відповідно. Звідки швидкість дії подібного насосу можна записати як

$$S_н = U_{12} - U_{21}P_2/P_1.$$

Конструкція молекулярних насосів

Молекулярні насоси з однаковим напрямком руху газу і відкачувальної стінки мають багато конструктивних різновидів. Одним з прикладів насоса, на статорі якого виконаний набір циліндричних канавок, вхідні і вихідні отвори в яких розділені перегородкою 1. Ротор 2 обертається з частотою, при якій його лінійна швидкість близька до теплової швидкості молекул газу, який відкачується (Рис. 1.6 *а,б*).

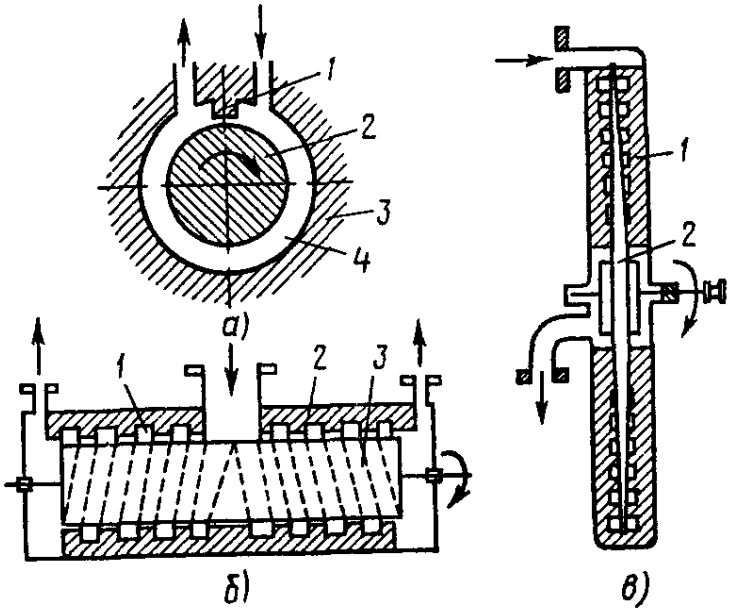

Рис .1.6 Молекулярні насоси паралельної дії.

Інший тип молекулярного насоса паралельної дії зображено на рис 1.6 *в).* Спіральний паз 1 на поверхні статора 2 і циліндрична поверхня ротора 3 утворюють робочий канал, спіральні канавки на торцевих поверхнях статора 1, віддалені на мінімальну відстань від обертового диска 2, та утворюють робочий канал .

До недоліків таких насосів можна віднести той факт, що через зазор між статором і ротором відбувається зворотне перетікання газу з камери стиснення в камеру всмоктування, що погіршує характеристики реальних насосів. Нормальна робота молекулярних насосів можлива при відстані між ротором і статором, що не перевищує 0,1 мм. Швидкість дії насосів прямо пропорційна частоті обертання ротора, яка може досягати 40 000 об/хв. Максимальна швикість дії не перевищує 100 л/с в зв'язку з відносно малим перерізом каналу. Граничний тиск 10^{-5} Па.

Молекулярні насоси з взаємно перпендикулярним рухом робочих поверхонь і потоку відкачуваного газу (або турбомолекулярні насоси, Рис. 1.7), класифікуються по розташуванню валу ротора - горизонтальні чи вертикальні; по розміщенню робочих органів - циліндричні, конусні, дискові або барабанні. У корпусі 2 насоса з горизонтальним валом встановлені нерухомі статорні колеса 4, між якими обертаються колеса 3, закріплені на роторі 1, Рис. 1.7 *а).* Роторні колеса виготовлені у вигляді дисків з прорізами. У статорних колесах є дзеркально розташовані прорізи такої ж форми. Для зручності монтажу статорні колеса розрізаються по діаметру. При діаметрі робочих коліс 200 мм зазори між роторним колесом і статорних можуть становити 1 ... 1,2 мм, що дозволяє значно підвищити надійність їхньої роботи. Граничний тиск турбомолекулярних насосів 10^{-8} Па. Найбільший випускний тиск 10 Па.

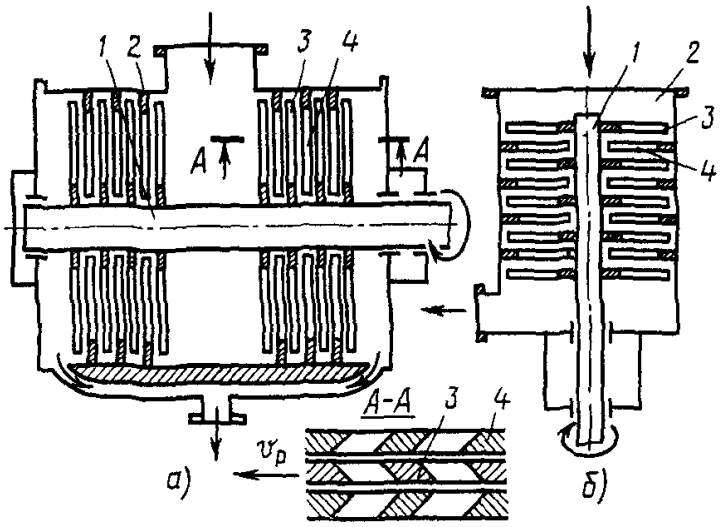

Рис .1.7 Турбомолекулярні насоси перпендикулярної дії.

До переваг таких насосів можна віднести широкий діапазон робочих тисків, висока питома швидкість дії, швидкий запуск насоса. Недоліки - високошвидкісний ротор з швидкозношуваними підшипниками складної конструкції. Для оптимізації роботи такого насосу рухома частина може встановлюватися на електромагнітну підвіску

ід роботи:

1. Ознайомитися з будовою та порядком ввімкнення ротаційного насоса.

2. Отримати вакуум середнього рівня в вимірювальному перетворювачі.

3. Ознайомитись з будовою, порядком ввімкнення масляного дифузійного насоса.

4. Підготувати до ввімкнення та ввімкнути дифузійний насос.

5. За допомогою ротаційного насоса отримати форвакуум в робочій камері кріостату.

6. Використовуючи набір вентилів та ротаційний насос, отримати високий вакуум в робочій камері кріостату за допомогою дифузійного насоса.
7. Ознайомитись з будовою та порядком ввімкнення турбомолекулярного насоса *Pfeiffer*.

8. Отримати високий вакуум за допомогою турбомолекулярного насоса.

9. Обчислити лінійну швидкість крайньої точки турбіни турбомолекулярного насоса при частоті обертання 1500 Гц та діаметрі турбіни 7 см. Порівняти отримане значення з середньою швидкістю руху молекул в повітрі при кімнатній температурі.

Список літератури:

1. Розанов Л. Н. Вакуумная техника, Москва, Высшая школа, 1990, 319 с.
2. Vacuum Technology Know How, Pfeiffer Vacuum technology
3. Фролов Е. С. Вакуусная техника: Справочник, Москва, Машиностроение, 1992, 480 с.

Лабораторна робота 2

ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ ВІДКАЧУВАННЯ ПАРІВ РІДКОГО ХОЛОДОАГЕНТУ.

Мета роботи. Вивчити принципи роботи, конструкцію та особливості використання азотного кріостату та гелієвого кріостатів з можливістю відкачки насичених парів рідкого холодоагенту, ознайомитися з можливостями додаткового охолодження зразків нижче температури кипіння кріорідини шляхом відкачки насичених парів у кріостаті.

Прилади та матеріали: азотний кріостат, гелієвий кріостат, посудини Дьюара, дифузійний паромасляний насос Вакма Н 100/350, допоміжні прилади контролю тиску.

Теоретичні відомості

Одним з часто використовуваних методів отримання температур, нижчих ніж температура кипіння кріорідини, є метод відкачування парів рідини у термоізольованій посудині. Принцип дії цього методу полягає на видаленні з парів кріорідини частини молекул, що збільшує імовірність виривання з поверхні рідини молекул з енергією, більшою за середньостатистичну енергію молекул в цій рідині. Це призводить до усередненого зменшення енергії рідини, а значить – зменшення температури рідини.

Теплота випаровування та тиск насичених парів над кріорідиною є важливими параметрами, що визначають можливості застосування даної кріорідини для отримання низьких температур.

Для отримання низьких температур можна використовувати ряд кріорідин, але, на сьогоднішній день, найчастіше використовуються рідкі гелій та азот. На рис. 2.1 зображено залежність насичених парів кріорідин різних елементів від температури. Точками показано температуру, котру можна досягнути на практиці, понижуючи тиск над відповідною кріорідиною.

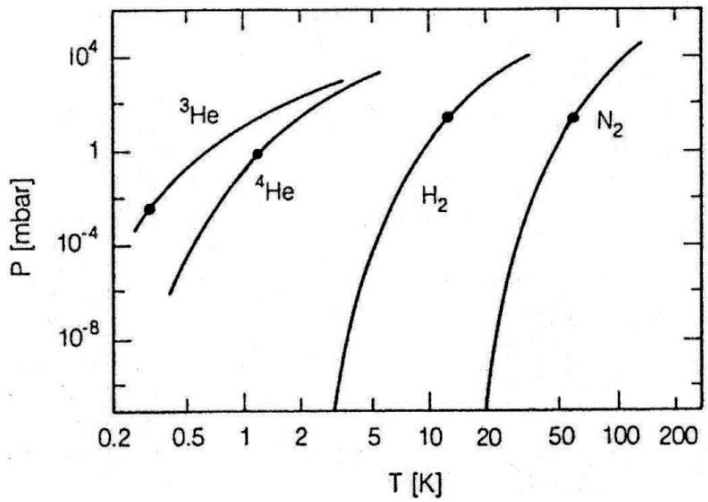

Рис. 2.1 Температурна залежність тиску насичених парів для різних кріорідин.

Перші роботи з відкачування парів в цьому напрямі виконані з застосуванням звичайного гелію, що є практично чистим ізотопом ^{4}He, при цьому можна отримати температуру 1,2 К. Пізніше для одержання наднизьких температур широко використовували ізотоп ^{3}He, що

трапляється в природі лише у вигляді домішки з концентрацією не більше 10^{-4} %. При використанні ізотопу гелію ^{3}He можна досягнути температур порядку 250 - 300 мК.

Рідкий гелій має унікальні властивості, багато з яких виявляються важливими при використанні його як холодоагента. Насамперед це відсутність потрійної точки, тобто збереження рідкого стану за тиску насичених парів до як завгодно низьких температур. Перехід ^{4}He у надплинний стан при T = 2,172 К полегшує процес вирівнювання температури в рідині при низьких температурах. Низьке значення теплоти випаровування гелію потребує ретельної теплоізоляції кріостатів, охолоджуваних гелієм.

Тиск насичених парів рідкого гелію можна отримати з рівняння Клаузіуса-Клапейрона:

$$dP/dT \approx L(T)P/RT^2; \qquad (2.1)$$

де L – прихована теплота випаровування.

Взявши до уваги, що теплота випаровування практично не змінюється в діапазоні температур 4,2 – 1,3 К, можемо отримати тиск насичених парів гелію як

$$P_{vap} \approx exp(-L/RT); \qquad (2.2)$$

Це рівняння показує експоненційну залежність тиску насичених парів рідкого гелію від температури. (Рис. 2.2)

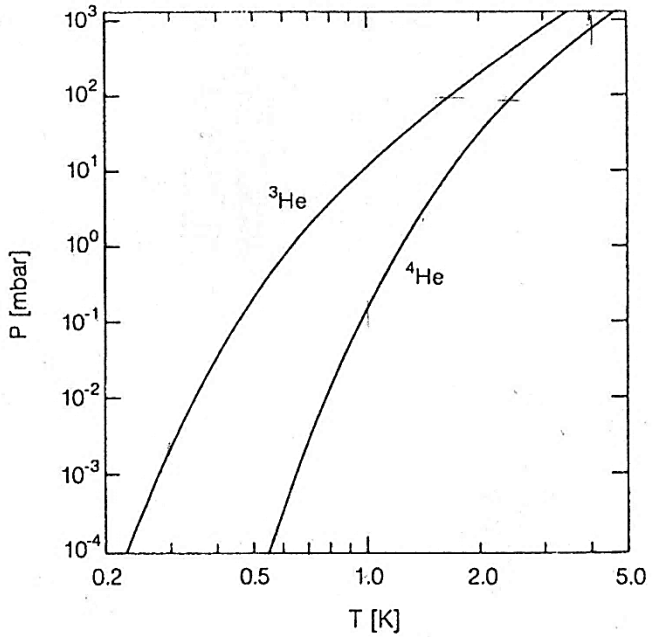

Рис. 2.2 Температурна залежність тиску насичених парів для ізотопів ^{4}He і ^{3}He.

Отже, тиск насичених парів ^{4}He експоненційно зменшується зі зниженням температури і при T< 1 К становить менше 10 Па. Тому для одержання низьких температур відкачуванням парів гелію необхідно використовувати потужні вакуумні насоси, причому з огляду на малу величину теплоти випаровування гелію, вони повинні мати досить високі швидкості відкачування.

Для рідини, пари якої відкачуються через систему відкачки, холодопотужність можна записати у вигляді

$$dQ/dt=dn/dt(H_{liq}-H_{vap})= dn/dt*L; \quad (2.3)$$

де n – кількість частинок, що рухаються в пару рідкого гелію, H_{liq} та H_{vap} – ентальпія рідини та пари гелію відповідно. Як правило, відкачування здійснюється зі сталою об'ємною швидкістю dV/dt, тому потік молекул за одиницю часу dn/dt буде пропорційний тиску пари над рідиною.

$$dn/dt\approx P_{vap}(T); \quad (2.4)$$

Використовуючи рівняння (2.2-2.4), холодопотужність такої системи можна записати як

$$dQ/dt\approx L* P_{vap}\approx exp(-1/T) \quad (2.5)$$

Рівняння (2.5) показує експоненційне зменшення холодопотужності із зменшенням температури, оскільки тиск насичених парів рідини зменшується з температурою, а це означає, що система відкачування стає все менш і менш ефективною. Саме цей факт визначає мінімальну температуру, котру можна отримати методом відкачування рідкого холодоагенту. Зменшення температури припиниться, коли потік тепла, що отримує кріостат буде рівний холодопотужності системи рефрижерації при заданій температурі.

Використовуючи метод відкачки насичених парів можна охолодити зразок до температури, що є нижчою ніж температура кипіння кріорідини. Недоліком такого методу є необхідність завершення експерименту після того як відбудеться випаровування всієї кріорідини із теплоізольованого об'єму. Для того щоб отримати можливість проводити експеримент тривалий час, розроблено систему до наповнення об'єму, що відкачується, кріорідиною. На Рис. 2.3 представлено конструкцію безперервного випаровувального кріостату на основі ^{4}He.

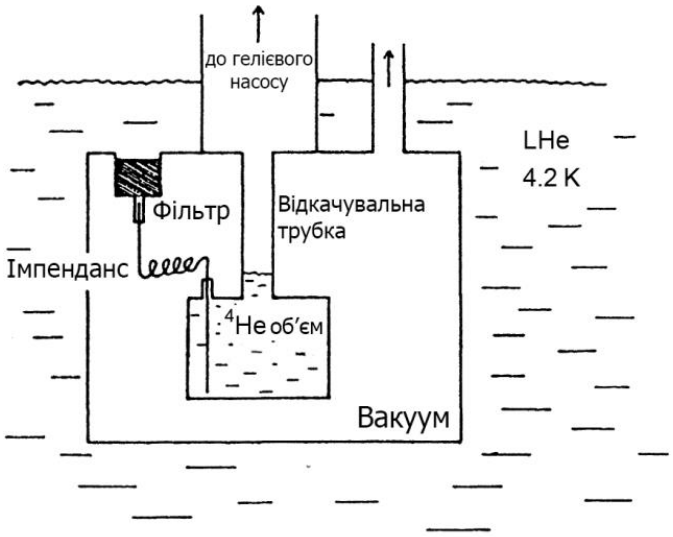

Рис 2.3 Принципова схема гелієвого кріостату з неперервним охолодженням в діапазоні температур 1.3-4.2 К.

У такому кріостаті невелика частка рідини з основної ємності з температурою 4.2 К проходить через відповідний імпеданс (опір) перетікання у невелику додаткову ємність розміром декілька см^3, що розташована у вакуумному просторі всередині кріостату. Через центральну трубку проводиться відкачування насичених парів гелію з внутрішнього об'єму, при цьому температура гелію внутрішньому об'ємі понизиться до 1.2 К. В силу малої величини теплоти випаровування ^{4}He, приблизно половина із наповненого у внутрішній об'єм гелію, буде використовується для охолодження самого гелію, інша половина може бути використана для охолодження експерименту.

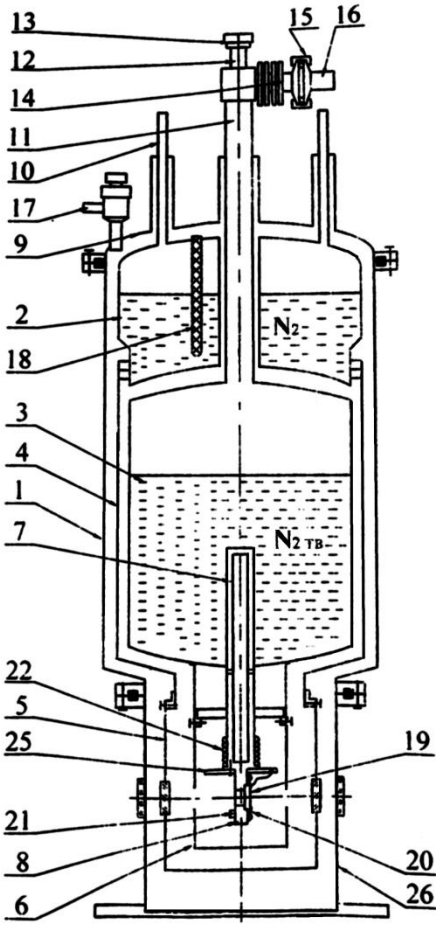

Рис 2.4 Схема азотного кріостату неперервним охолодженням з можливістю відкачки парів азоту.

У загальному випадку, швидкість відкачування *V*, опір тракту відкачування з провідністю *F* і швидкість дії помпи V_n пов'язані співвідношенням

$$1/V=1/F+1/V_n \qquad (2.6)$$

Час, потрібний для досягнення необхідної температури, залежить від ефективної швидкості відкачування насосу і з'єднувальних трубопроводів. Приблизно час відкачування парів гелію над рідиною можна розрахувати за співвідношенням

$$t_{12}=(V/S*v)*ln(P_1/P_2) \qquad (2.7)$$

де *V* - об'єм порожнини, з якої відкачують газ; *S* - площа поперечного перерізу відвідного трубопроводу; *v* - швидкість парів під час відкачування; P_1, P_2 - тиск парів газу над рідиною на початку і в кінці відкачування.

Для отримання температури, 45-77 К можна використати вакуумний азотний кріостат, схема якого показана на Рис. 2.4.

У верхній частині корпусу 1 розміщуються два азотних баки: верхній 2 і нижній 3. Верхній азотний бак 2 охолоджує мідний екран 4, котрий оточує внутрішній екран 6, з можливістю його демонтажу. Цей екран закриває мідний палець 7 - мідна пластина, що виконує роль теплового містка між рідкою фазою азоту та з зразкотримачем 8. Азот в баці 3 охолоджує верхню частину зануреного в нього пальця 7 в нижній його частині до температур нижче 77 К за рахунок відкачки насичених парів над поверхнею конденсованої фази азоту. При цьому азот переходить з рідкої фази в тверду. Верхній азотний бак 2 і нижній азотний бак 3 підвішені до кришки 9 корпуса на тонкостінних трубках з низькою теплопровідністю. Трубки 10 підвіски бака 2 використовуються для заливки рідкого азоту в бак. Нижній азотний бак 3 підвішений до кришки 9 корпуса на трубці 11, що використовується для заливки рідкого азоту в бак 3 через трубку 12 із ущільненням, а також для відкачки парів азоту з вихідною магістраллю через хомут 15 і патрубок 16. Вакуумна порожнина кріостату відкачується форвакуумним насосом через вакуумний кран 17. Вакуум підтримується в процесі роботи кріонасосом 18. На зразкотримачі 8 з однієї сторони закріплюється зразок 19 за допомогою пружинних контактів 20, а з протилежної сторони - сенсор температури 21.

Хід роботи:

1. Ознайомитися з будовою вакуумного азотного кріостату.

2. Провести відкачку вакуумного об’єму кріостату з допомого дифузійного насосу.

3. Залити рідкий азот в верхній та нижній баки кріостату.

4. Залити рідкий азот в кріогенну пастку та охолоджувальну систему дифузійного насоса

5. Ввімкнути насос відкачування, попередньо під’єднавши вихід з робочої камери кріостату до вхідного патрубка вакуумного насоса.

6. Отримати часову залежність температури теплопровідної пластини за допомогою автоматизованого комплексу запису інформації.

7. Визначити температуру переходу рідкого азоту в твердий стан.

8. Визначити час релаксації температури в кріостаті використовуючи отриману часову залежність від температури.

9. Апроксимувати отриману криву та визначити мінімальну температуру, яку можна отримати, відкачуючи насичені пари рідкого азоту. Порівняти отримане значення з даними з літератури.

Список літератури:

1. Франів А.В. Фізика і техніка низьких температур.- Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка 2008, 168 с.
2. Веркин Б.И. Криогенная техника.- Киев: Наукова думка. 1985, 195 с.
3. Pobell F. Matter and Methods at Low Temperatures.- Springer-Verlag: Berlin Heidelberg 1992, 319 p.

Лабораторна робота 3

ОХОЛОДЖЕННЯ І ЗРІДЖЕННЯ КРІОГЕННИХ ГАЗІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИКЛУ КАРНО

Мета роботи. Вивчити принципи роботи, конструкцію холодильно-газової машини для одержання рідкого азоту ЗІФ-1001, отримати зріджене повітре та визначити його температуру кипіння.
Прилади та матеріали: установка для одержання рідкого азоту ЗІФ-1001.

Теоретичні відомості

Принцип дії холодильної машини, робота якої ґрунтується на зворотньому циклі Карно – замкненому ідеальному циклі, що складається з двох ізотерм і двох адіабат (рис. 3.1). Для розгляду циклічних процесів припускають, що робочим елементом є ідеальний газ, який міститься у спеціальному циліндрі, закритому рухомим поршнем. Стінки циліндра на окремих ділянках циклу можна зробити теплоізольованими (адіабатичний процес) або теплопровідними (ізотермічний процес).

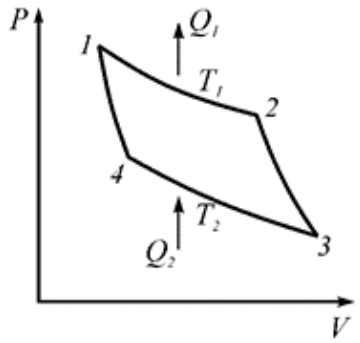

Рис.3.1 Цикл Карно.

Якщо машину Карно запустити у зворотному напрямку *1-4-3-2-1*, то в такому разі, зовнішні сили виконуватимуть роботу над системою, в результаті чого система перетворюватиме частину цієї роботи в теплоту. Для цього на ділянці *1-4* газ адіабатно розширюють, в результаті чого він охолоджується до температури T_2. На ділянці *4-3* його розширюють ізотермічно і він виконує роботу. Газ, щоб зберігати сталу температуру T_2, мусить забирати від холодильника якусь кількість теплоти Q_2. Починаючи від точки *3* газ адіабатно стискають. Його температура підніметься до T_1. На ділянці *2-1* ізотермічно за температури T_1 зменшують об'єм газу. При цьому зовнішні сили повинні виконати роботу, більшу від тієї, яку виконував газ на ділянці *1-4-3,* оскільки стискання відбуватиметься за вищої температури. Під час ізотермічного стискання на ділянці *2-1* температура газу має бути сталою і дорівнювати T_1, тому він мусить віддавати нагрівнику певну кількість теплоти, яка дорівнює сумі кількості теплоти, взятої у холодильника, і кількості теплоти, еквівалентної роботі, виконаній зовнішніми силами під час стискання газу. Отже, на ділянці *4-3* в систему надходить теплота, а на ділянці *2-1* система віддає більше теплоти, ніж її надійшло в систему на ділянці *4-3*.

Таким чином, виконавши роботу над газом, у зворотному циклі Карно можна змусити газ забирати певну кількість теплоти від холодного тіла і віддавати її більш нагрітому.

Будова та принцип дії кріогенної газової машини

Основними агрегатами кріогенної газової машини, що забезпечують отримання низької температури є: компресор, гелієвий холодильник, регенератор, витіснювач і зріджувач, які виконані у вигляді одного герметичного агрегата, заповненого кріогентом – гелієм і змонтованого разом з електродвигуном на загальній плиті.

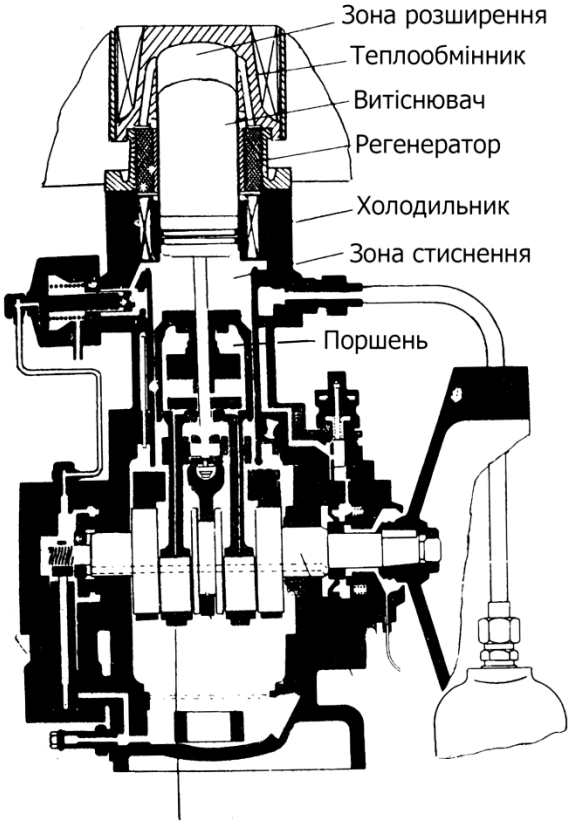

Рис.3.2 Схема кріогенної газової машини в якій в якості робочого газу використовується гелій.

Гелій володіє нижчою температурою конденсації, ніж гази, для яких призначена машина. Крім того, гелій є інертним газом, що забезпечує безпеку експлуатації машини.

Процес зрідження газів здійснюється в зріджувачі в результаті безпосереднього дотику зріджуваного газу з холодною поверхнею стінок корпусу теплообмінника. Холод, необхідний для зрідження газів, отримується у верхній площині компресора, що дотикається з теплообмінником зріджувача, за рахунок періодичного розширення гелію в цій площині.

Процес «отримання холоду» побудований на принципі зниження температури попередньо стисненого і охолодженого в холодильнику і регенераторі гелію при його розширенні. Шляхом багаторазового повторення циклу стискання і розширення температура гелію досягає -200ºС.

Розглянемо етапи циклу роботи кріогенної газової машини:

1 фаза-стискання. Витіснювач здійснює мале переміщення у крайньому верхньому положенні, при цьому поршень переміщується вверх, стискаючи гелій у всьому робочому просторі. На цьому етапі основна маса гелію знаходиться між поршнями.

2 фаза-проштовхуванняя. Поршень здійснює мале переміщення у крайньому верхньому положенні, а витіснювач переміщується вниз, проштовхуючи гелій без зміни його об’єму через холодильник і регенератор в зону розширення. В холодильнику теплота стискання відводиться проточною охолоджуючою водою. В регенераторі більша частина залишкового тепла, поглинається насадкою регенератора, а гелій

охолоджується за рахунок холоду, накопиченого під час попереднього циклу охолодження.

3 фаза-розширення. Поршень і витіснювач одночасно зміщуються вниз, об'єм над витіснювачем (зона розширення) при цьому збільшується, гелій розширюється і охолоджується до -200°С.

4 фаза-проштовхування. Поршень здійснює мале переміщення у крайньому нижньому положенні, а витіснювач переміщується вверх, переганяючи холодний гелій із зони розширення в зону стиснення. При цьому частина холодну поглинається теплообмінником зріджувача, а інша частина – насадкою регенератора, таким чином гелій з регенератора виходить з плюсовою температурою.

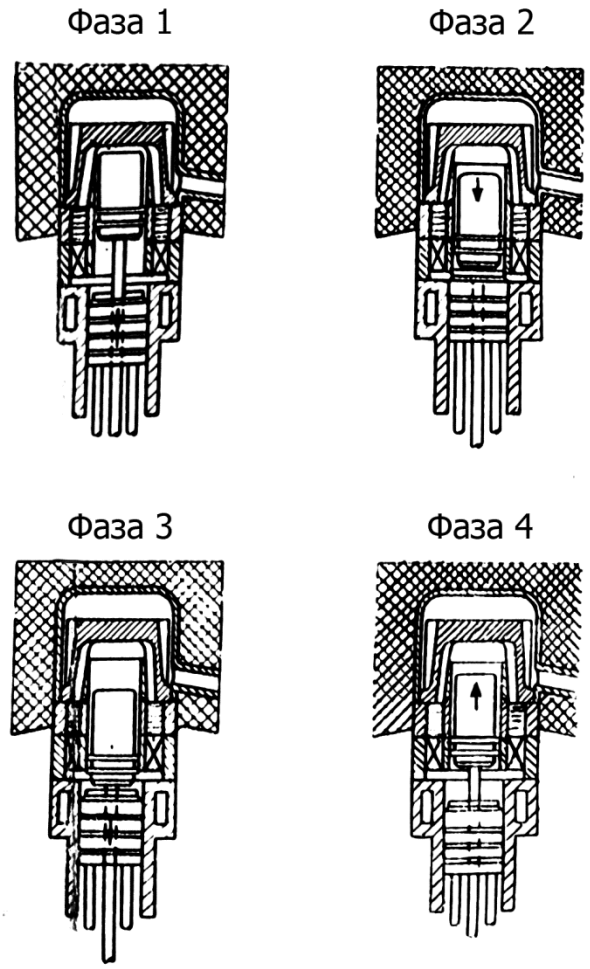

Рис. 2.3 Фази роботи кріогенної газової машини.

Таким чином, в машині одночасно відбуваються два процеси: процес «отримання холоду» – внутрішній процес і процес конденсації газів – зовнішній процес. Важливо відзначити, що насадка регенератора виконує роль акумулятора тепла і холоду. Від правильного вибору регенератора і більшій мірі залежить ефективність роботи КГМ.

Робота машини автоматично контролюється приладами керування за такими параметрами:

- розхід охолоджуваної рідини в системі охолодження;
- тиск масла в системі змащування;

– робочий тиск гелію в машині.

При виході будь-якого із цих параметрів за допустимі межі машина автоматично зупиняється.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з будовою зріджувальної установки ЗІФ-1001.
2. Вивчити порядок підготовки машини до роботи.
3. Ознайомитися з порядком увімкнення і роботи установки.
4. Вивчити порядок вимкнення установки.
5. Отримати зріджене повітря.
6. Виміряти температуру зрідженого повітря.
7. Користуючись діаграмою стану азот-кисень, поданою в наступній лабораторній роботі, та за відомим складом повітря, визначити температуру кипіння рідкого повітря та порівняти з експериментально отриманим значенням.

Список літературних джерел

1. А. Франів, В. Стадник, В. Курляк Фізика низьких температур.- Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 2016, - 362 с.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. М.П. Малкова. 3 изд. - М., 1985.
3. Уайт Г.К. Экспериментальная техника в физике низких температур. - М.: Физматгиз, 1961.–– 231 с.
4. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Теория и расчет криогенных систем. - Москва: «Машиностроение», 1978. - 415 с.
5. Веркин Б.И. и др. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур: Справочник / АН УССР, Физико-технический институт низких температур. - Киев: «Наукова думка», 1987. - 196 с.

Лабораторна робота 4

ОТРИМАННЯ РІДКОГО АЗОТУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ЗРІДЖЕНОГО ПОВІТРЯ

Мета роботи. Вивчити принципи роботи, конструкцію кріогенної газової машини для одержання рідкого азоту ЗІФ-1002, вивчити будову та конструктивні елементи ректифікаційної колони, ознайомитись з процесом розділення зрідженого повітря у ректифікаційній колоні.

Прилади та матеріали: установка для одержання рідкого азоту ЗІФ-1002, дьюар для зберігання рідкого азоту

Теоретичні відомості

Розділення рідкого повітря.

У фізиці низьких температур важливою задачею є отримання чистого рідкого холодоагенту з визначеною температурою кипіння, який в подальшому можна використати у системах кріостатування для охолодження внутрішніх частин кріостату.

Існує багато способів розділення сумішей на складові частини: випаровування, конденсація, дефлегмація, ректифікація, абсорбція, адсорбція та ін. Всі ці методи в тій чи іншій мірі використовуються в кріогенній техніці, однак найширшого застосування набули процеси ректифікації і адсорбції.

Середовищем у ректифікаційних установках є різні газові суміші, такі як повітря, природний газ, нафтовий газ, газ синтезу аміаку тощо. Більшість сумішей містить багато компонент: повітря, наприклад, являє собою суміш газів, вказаних в таблиці. Однак для спрощення розрахунку розділювальних апаратів замість багатокомпонентних сумішей іноді розглядають простіші системи, які складаються із двох, трьох або чотирьох компонентів. Так, основними компонентами повітря є азот і кисень, тому в низці випадків його умовно розглядають як бінарну систему, яка складається із 20,9 % O_2 і 79,1% N_2 з домішкою аргону. При точних розрахунках розділювальних апаратів і, звичайно, при отриманні з повітря аргону, азоту і кисню повітря розглядають як потрійну систему O_2-Ar-N_2. Це тим більше необхідно, оскільки в окремих перерізах апарату вміст аргону в суміші може досягати 15-20 %. При розрахунку апаратів для отримання криптонового концентрату розділювану суміш переважно розглядають як бінарну, яка складається із кисню і криптону, умовно відносячи до останнього ксенон. Можна привести і інші приклади. Склад суміші переважно виражають молярними частками компонент.

Склад сухого атмосферного повітря біля поверхні Землі

Компоненти	Вміст компоненти при нормальних умовах $см^3/м^3$	Об'ємна частка, %	Масова частка, %
Азот N_2	780 870	78,087	75,52
Кисень O_2	209 500	20,95	23,15
Аргон Ar	9 300	0,93	1,282
Двоокис вуглецю CO_2	300	0,03	0,046
Неон Ne	18	$18\cdot10^{-4}$	$12,5\cdot10^{-4}$
Гелій He	5,24	$5,24\cdot10^{-4}$	$0,72\cdot10^{-4}$
Інші	6,76	$6,76\cdot10^{-4}$	$6,78\cdot10^{-4}$

При розділенні газової суміші на складові частини потрібно затратити певну кількість енергії. Низькотемпературні методи розділення сумішей достатньо широко застосовують у промисловості, оскільки у багатьох випадках вони є економнішими від інших способів. При цьому газову суміш необхідно попередньо охолодити, а в низці випадків і піддати зрідженню перед подачею на розділення.

Процес ректифікації бінарної суміші

Ректифікацією називають процес розділення подвійних або багатокомпонентних сумішей за рахунок протипотокового масо- та теплообміну між парою та рідиною в адіабатичних умовах при сталому тиску. Ректифікація характеризується розділенням рідких сумішей на практично чисті компоненти, температури кипіння яких відрізняються між собою, за рахунок багатократного випаровування рідини і конденсації парів.

Метод ректифікації широко застосовують для промислового розділення газових сумішей в кріогенних установках. За його допомогою можна одержати низько- і висококиплячі компоненти з достатньо великим ступенем вилучення. Для втілення методу необхідно організувати рух нерівноважних пари G і рідини g, які складаються із однакових компонентів, і забезпечити достатню поверхню контакту між ними. При цьому в парі, яка зустрічається зі стікаючою рідиною, міститься більше "висококиплячої" компоненти кисню, ніж в рівноважній парі. Стікаючу в колоні рідину називають *флегмою*, відношення кількостей пари G і рідини g, які проходять через поперечний перетин колони, який розглядається, - *флегмовим співвідношенням*:

$$f = \frac{g}{G}. \tag{4.1}$$

Розглянемо докладніше процес, який відбувається в колоні. Нехай до одного і того ж проміжного перетину колони притікають нерівноважні пара і рідина з різною температурою. При їхній взаємодії відбудуться процеси тепло-і масообміну в напрямку встановлення рівноваги. Температура початку конденсації суміші пари (азот+кисень) вища від температури початку кипіння рідкої суміші того ж складу. Це видно із діаграми (Рис. 4.1), побудованої для випадку розділення рідкого повітря на азот і кисень.

Верхня крива діаграми V являє собою так звану "лінію пари", а нижня L – "лінію рідини". Ці лінії відповідно характеризують залежність температури конденсації пари і температури кипіння від складу суміші. "Лінія пари" і "лінія рідини" перетинаються у точках, яким відповідає 100 % вміст у суміші однієї із складових її компонент. Аналіз діаграми свідчить, що у випадку рівноважного стану системи "рідина – пара" (який характеризується тим, що пара і рідина мають однакові тиск і температуру) в суміші парів буде вміщуватися більше азоту, ніж в рідині (точки *Д* і *С* на діаграмі).

З іншого боку, із діаграми видно, що кипляча рідина має нижчу температуру, ніж насичена пара того ж складу (точки *А* і *В* на діаграмі). Тому при змішуванні рідини і пари однакового складу буде відбуватися часткова конденсація пари на поверхні рідини і одночасно часткове випаровування рідини, при цьому пара буде збагачуватися азотом, а рідина – киснем. Очевидно, що рівноважний стан системи "рідина – пара" може бути досягнутий і у випадку різного складу рідкої суміші і суміші пари (точки *Е* і *F* на діаграмі). Перехід такої системи із нерівноважного стану в рівноважний при вищій в порівнянні з рідиною температурі пари пов'язаний також зі

збагаченням рідини киснем, а пари над нею – азотом. Це явище і покладено в основу процесу розділення повітря в колоні на азот і кисень.

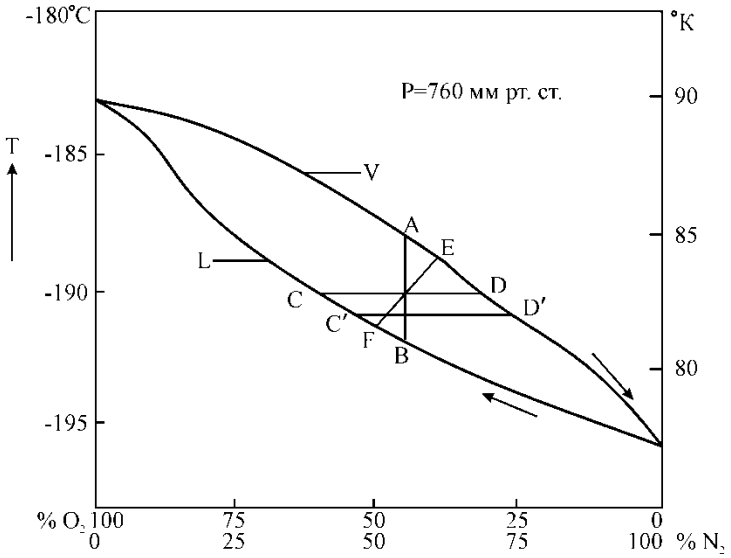

Рис.4.1 Діаграма стану азот-кисень.

Для реалізації процесу необхідні апарати з розвинутою поверхнею контакту між фазами. Такі апарати називають *ректифікаційними колонами.* Схема азотної ректифікаційної колони показана на рис. 4.2.

Азотна ректифікаційна колона (рис.4.2) складається з вертикальну циліндричної вертикальної труби-корпусу 18, внутрішня частина якої заповнена насадкою 14. В якості насадки використовуються куски металічної сітки сідлоподібної форми. Основна функція насадки – забезпечення максимальної площі контакту між стікаючою азотною флегмою та повітрям в газоподібному стані, що піднімається вгору по колоні. У верхній частині колони змонтовано розсіювач 19, що забезпечує рівномірний розподіл флегми по всьому поперечному перерізі колони, що унеможливлює утворення локальних суцільних потоків рідини. У корпусі колони змонтовано насос, що складається з труби 23 і напірної трубки 22, по якій подається флегма у верхню частину колони. Від труби 23 відведена зливна трубка 13 з гідравлічним затвором. В нижній частині колони розміщено ще один розсіювач, 17 аналогічний верхньому.

При роботі колони атмосферне повітря затягується через повітряний впускний клапан 9, далі подається в кільцевий об’єм 6, де розміщений змійовик-теплоообмінник 27. По змійовику 27 рухається холодний газоподібний кисень. Вхідне повітря обдуває цей змійовик–теплообмінник, при цьому повітря охолоджується з конденсацією атмосферної вологи, а кисень у змійовику нагрівається. Далі повітря рухається через сітку 31 між вертикальними трубками 29, при цьому з нього виморожується залишкова волога і оксид вуглецю, що затримуються на сітці у вигляді снігу, повітря при цьому охолоджується ще більше.

Всередині колони підтримується перепад температур між верхньою (холодною) і нижньою (нагрітою) частинами насадки. Рідка суміш азоту і кисню стікає по насадці вниз. Назустріч потоку рідини піднімається пара, що складається із суміші азоту і кисню, які легко проходять через насадку. Конструкція насадки забезпечує тісний контакт стікаючої рідини з потоком пари, яка піднімається вгору. Внаслідок різниці температур, що підтримується між верхньою і нижньою частинами колони, температура рідкої суміші в потоці, який стікає зверху, буде дещо

нижча від температури суміші парів, потік яких піднімається вгору колоною, в будь-якій частині колони. Цей протитічний рух взаємодіючих фаз (“рідина–пара”) супроводжується процесами теплообміну і масообміну, які в кожній частині колони протікають до моменту досягнення стану рівноваги. При цьому потік пари, який йде догори, неперервно збагачується більш летким (низькокиплячим) компонентом – азотом, а стікаючий потік рідини збагачується менш летким (висококиплячим) компонентом – киснем.

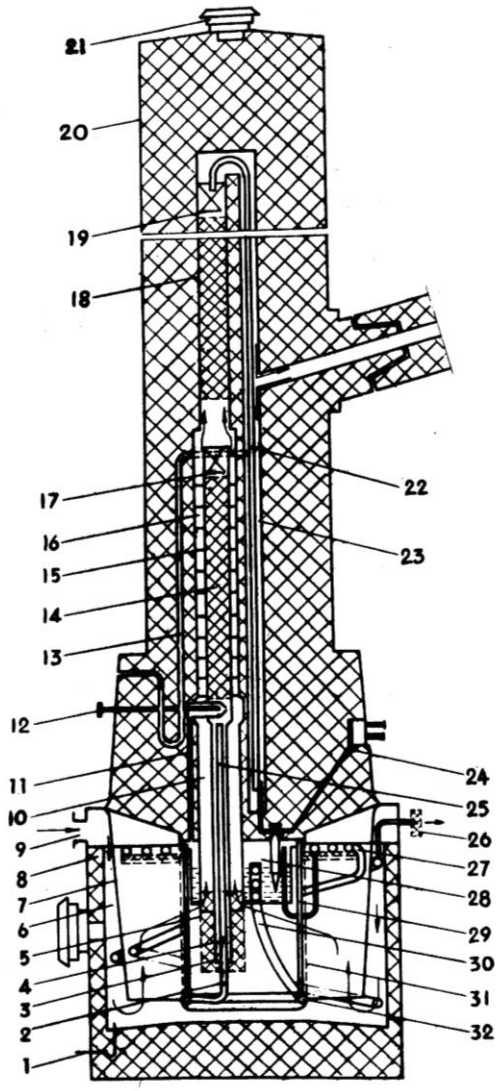

Рис.4.2 Схема азотної ректифікаційної колони.

Пара, яка залишає певну частину насадки колони, рівноважна з рідиною, що стікає з тієї ж частини насадки колони. На наступній, розташованій вище, частині насадки пара знову взаємодіє з рідиною іншого складу до моменту досягнення з нею рівноваги. Така послідовна, багаторазово повторювана взаємодія потоків пари і рідини супроводжується неперервною і суттєвою зміною їхнього складу до моменту отримання продукту заданої чистоти.

В результаті розділення повітря у верхній частині колони концентрується суміш парів, збагачена леткою (низькокиплячою) компонентою – азотом (так званий “верхній продукт”), а в

нижній частині накопичується рідина, збагачена менш леткою (висококиплячою) компонентою – киснем (так звана “кубова рідина” або “нижній продукт”).

Пара азоту поступає у зріджувач кріогенної газової машини і конденсуються. Частина рідкого азоту використовується для зрошування азотної колони, а решта рідкого азоту зливається як готовий продукт.

Рідкий кисень, стікаючи з колони у трубку 32, використовується для охолодження повітря, яке всмоктується в колону, при цьому кисень випаровується і відводиться в газоподібному стані в атмосферу через змійовик 27 і клапан 28, а його частина у газоподібному стані рухається по трубі 11 через клапан 12 подається в колону для продовження процесу розділення. В зоні входження повітря в колону приблизно підтримується температура, що відповідає температурі конденсації повітря

Опис принципової схеми роботи установки

Принципова схема установки для одержання рідкого азоту ЗІФ-1002 зображена на Рис. 4.3. Атмосферне повітря, яке засмоктується в колону через повітряний клапан 1, поступає в теплообмінник–випаровувач 3, де охолоджується киснем, при цьому із повітря виморожується волога і вуглекислота.

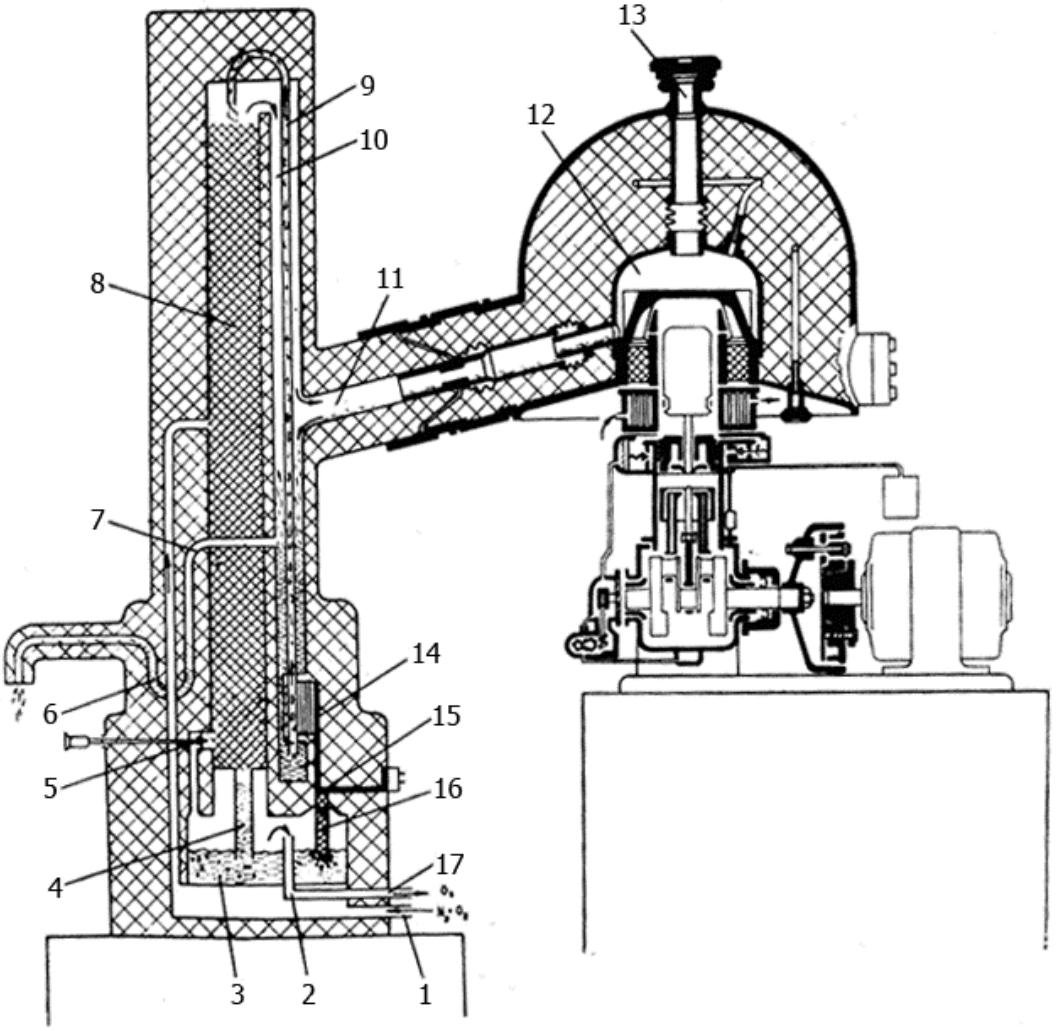

Рис.4.3. Принципова схема установки для одержання рідкого азоту ЗІФ-1002.

Рідкий кисень випаровується за рахунок тепла, яке віддається втягнутим повітрям. Частина пари кисню через клапан 5 поступає знову в колону, а решта пари змійовиком 2 через випускний клапан 17 відводиться в атмосферу.

Повітря, охолоджене і очищене від вологи і вуглекислоти, поступає в колону і, проходячи через насадку 8, розділюється на азот і кисень. Пара азоту із верхньої частини колони через трубу 10 пароструменевого насоса і патрубок 11, який з'єднує колону зі зріджувачем кріогенної газової машини, поступають в зріджувач і конденсуються. Рідкий азот патрубком 11 стікає в колону, де накопичується в нижній частині каналу 10 пароструменевого насоса. При досягненні рівня зливної труби 7 рідкий азот через гідравлічний затвор 6 зливається із колони. Частина рідкого азоту напірною трубою 9 пароструменевого насоса подається вгору в ролі флегми для зрошування колони. Рідкий кисень стікає вниз колоною і крізь гідравлічний затвор 4 потрапляє у випаровувач 3.

Система автоматичного керування колоною.

Конструкція колони передбачає автоматичне регулювання інтенсивності потоків атмосферного повітря, яке засмоктується в колону для подальшого розподілу на складові компоненти: газоподібний кисень, який відводиться в атмосферу і рідкій азот, який поступає зі зріджувача і розділяється на готовий продукт і флегму, яка служить для зрошування колони.

Система регулювання кількості відведеного в атмосферу газоподібного кисню.

Частина пари кисню, яка утворюються у випаровувачі 3, направляється в колону, а решта пари відводиться в атмосферу. Для забезпечення автоматичного регулювання подачі необхідної кількості пари кисню в колону в її конструкції передбачені спеціальні пристрої: гідравлічний затвор 4, який перешкоджає проходженню пари кисню в колону поза клапаном 5; клапан 5, який дозволяє створити у випаровувачі тиск, що забезпечує автоматичне викидання надлишкової кількості пари кисню в атмосферу.

Кількість випаровуваного рідкого кисню у випаровувачі пропорційна кількості теплоти, яка віддається атмосферним повітрям. Будь-яка зміна кількості повітря, яке поступає в колону, автоматично викликає пропорційну зміну кількості кисню, який відводиться у вигляді пари в атмосферу.

Це означає, що відношення об'ємів поступаючого в колону атмосферного повітря і пари кисню, яка викидається в атмосферу, практично залишається незмінним.

Як правило, клапан 5 регулюється таким чином, що об'єм пари кисню, яка викидається в атмосферу, становить не менше 25 % від об'єму засмоктуваного в колону атмосферного повітря. Оскільки кисень займає приблизно 22% повітря за об'ємом, у парі кисню, що відводиться з колони, буде міститися небагато азоту. Таке невелике перевищення об'єму кисню, який викидається в атмосферу із колони, гарантує чистоту одержуваного рідкого азоту.

Простота системи регулювання тиску пари кисню у випаровувачі полегшує експлуатацію і догляд за установкою в умовах значних коливань відносної вологості навколишнього середовища, наростання шарів снігу і вуглекислоти на трубах теплообмінника і зміни умов роботи кріогенної газової машини.

Система розділення конденсату (рідкого азоту) на флегму і готовий продукт

Для подачі флегми у верхню частину колони використовується пароструменевий насос. Насос складається з трубки 10, частково заповненої рідким азотом і U-подібної трубки 9, нижній кінець якої занурений в рідкий азот (див. Рис. 4.3). Трубка 10 і трубка 9 формують систему сполучених посудин.

Бульбашки парів азоту, що утворюються в нижній частині трубки 9 піднімаються по ній вверх, насичуючи при цьому рідину. Внаслідок цього питома вага рідини в трубці зменшується і її рівень буде підвищуватися. В кінцевому рахунку частина рідини підніметься вверх і переллється через U-подібне коліно і буде зрошувати колону. Залишкова частина рідкого азоту буде зливатися з колони через зливну трубу 7 з гідравлічним затвором 6.

Випаровування рідкого азоту з нижньої частини трубки 9 здійснюється за рахунок використання нагрівального елементу 14, що виготовлений з мідної пластини, один кінець якої перебуває в безпосередньому тепловому контакті з нижнім кінцем трубки 9 а інший омивається проточною водою.

Використання пароструминного насосу для зрошення колони дозволяє здійснити автоматичне розділення конденсату флегми і готового продукту.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з будовою розділювальної установки ЗІФ-1002.
2. Вивчити порядок підготовки машини до роботи.
3. Ознайомитися з порядком увімкнення і роботи установки.
4. Вивчити порядок вимкнення установки.
5. Провести процес розділення зрідженого повітря.
6. Переконатись у реалізації процесу розділення зрідженого повітря на рідкий азот (вимірявши його температуру) та на газоподібний кисень (переконавшись у його виділенні з колони розділювальної машини).

Список літературних джерел

1. А. Франів, В. Стадник, В. Курляк Фізика низьких температур.- Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 2016, - 362 с.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. М.П. Малкова. 3 изд. - М., 1985.
3. Уайт Г.К. Экспериментальная техника в физике низких температур. - М.: Физматгиз, 1961.–231 с.
4. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Теория и расчет криогенных систем. - Москва: «Машиностроение», 1978.-415 с.
5. Веркин Б.И. и др. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур: Справочник / АН УССР, Физико-технический институт низких температур. - Киев: «Наукова думка», 1987. - 196 с.

Лабораторна робота 5

ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ГЕЛІЄВОГО КРІОСТАТУ ТА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СИСТЕМИ УТРЕКС К43

Мета роботи. Вивчити принципи роботи, конструкцію азотних та гелієвих кріостатів, ознайомитися з методами вимірювання при низьких температурах.

Прилади та матеріали: Гелієвий кріостат, посудини Дьюара, регулятор температури УТРЕКС К43, набір гумових трубок, манометр, додаткові матеріали.

Теоретичні відомості

Низькотемпературна система УТРЕКС розроблена для кріостатування об'єктів фізичних досліджень у температурному діапазоні 4,2-350 К з високою точністю стабілізації температури у всьому температурному діапазоні. Кріогенна лабораторно-дослідна система УТРЕКС складається з кріостату та системи регуляції температури УТРЕКС К43.

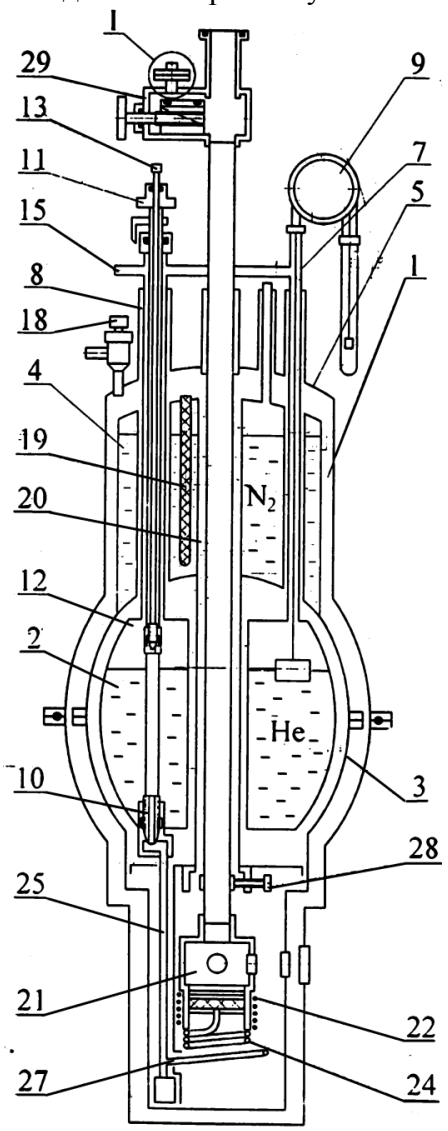

Рис 5.1 Будова гелієвого кріостата

Сучасна модифікація системи УТРЕКС відрізняється від попередніх версій повною автоматизацією контролю і стабілізації температури із регулятором температури з вбудованим мікропроцесором, що дозволяє спростити використання системи та підвищує точність стабілізації температури в широкому діапазоні. Особливістю системи кріостату та температурного регулятора є можливість використовувати як рідкий гелій так і рідкий азот в якості основного кріоагенту

Будова гелієвого кріостата.

При побудові кріостату використано вакуумну камеру 1 для термічної ізоляції від впливу температур зовнішнього середовища, та систему радіаційних екранів: зовнішнього 5 та внутрішнього 3. Основна функція радіаційних екранів – захист внутрішнього об'єму кріостату від впливу електромагнітного випромінювання, що є особливо актуальним для гелієвих температур і можуть призводити до нагрівання внутрішніх елементів кріостату за рахунок випромінювального теплообміну. Внутрішній радіаційний екран 3 охолоджується до температури рідкого азоту 77 К. В кріостаті змонтовано два баки для заливання рідкого холодоагенту: зовнішній бак 4 і внутрішній бак 2. При охолодженні кріостату до температури 4,2 К у внутрішній бак 2 заливається рідкий гелій, а у зовнішній – рідкий азот. При роботі кріостату з мінімальною температурою 77 К у обидва баки заливається рідкий азот. У зовнішньому баку 4 змонтовано кріонасос 19, що здійснює активне поглинання залишкового газу після відкачки кріостата з допомогою вентиля 18. У внутрішньому баку 2 змонтовано голковий вентиль 10, з можливістю ручної регуляції 13. Голковим вентилем 10 здійснюється регулювання подачі азоту або гелію з'єднувальну трубку 25 та випаровувальну систему

кріостату 27. Далі, газ проходить у змійовик 24 для більш рівномірного охолодження робочої камери кріостату 21. Після проходження змійовика, змонтованого на зовнішню частину робочої камери, холодний газ потрапляє у робочу камеру кріостату 21 через розсіювач, закріплений на її дні. Для підвищення точності регуляції та стабілізації температури, на нижню частину робочої камери 21 на рівні розсіювача накладено нагрівач 22. У внутрішньому баці встановлений поплавок механічного покажчика рівня рідкого гелію 9. Блок і індикаторний пристрій змонтовані ззовні кріостата. Робоча камера оснащена вікнами із плавленого кварцу або сапфіру, що дають можливість проводити спектральні та оптичні дослідження в області довжин хвиль 0,2-2 мкм. Схеми підключення кріостату для роботи з рідким гелієм та рідким азотом наведено на рисунках 5.2 та 5.3 відповідно.

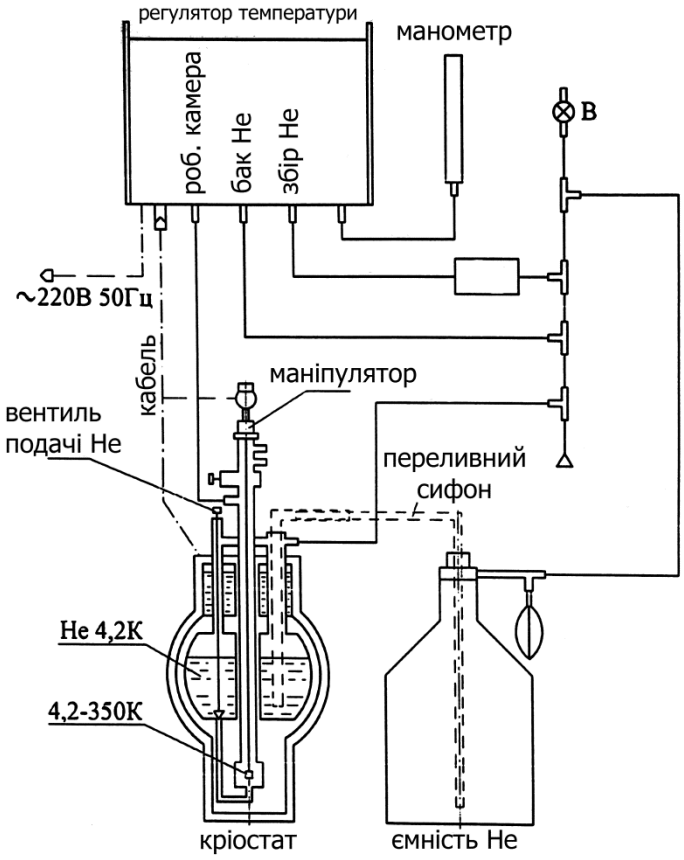

Рис 5.2 Схема підключення кріостату до регулятора температури для роботи в діапазоні температур 4,2-350 К

У низькотемпературній системі УТРЕКС реалізовано принцип газопротічного кріостату з можливістю регуляції тиску в робочій камері. Охолодження зразка здійснюється за рахунок обдування парами холодного газу, що знімає необхідність забезпечувати хороший тепловий контакт досліджуваного зразка з холодною частиною кріостату, та дозволяє використовувати зразки довільної форми. При герметизації робочої камери разом із шахтою, куди поміщається шток з тримачем для зразків, тиск в ній піднімається, що призводить до зменшення швидкості охолодження зразка. Якщо понизити тиск в робочій камері кріостату та шахті, нова порція холодного газу потрапляє в робочу камеру, що спричиняє збільшення швидкості охолодження зразка.

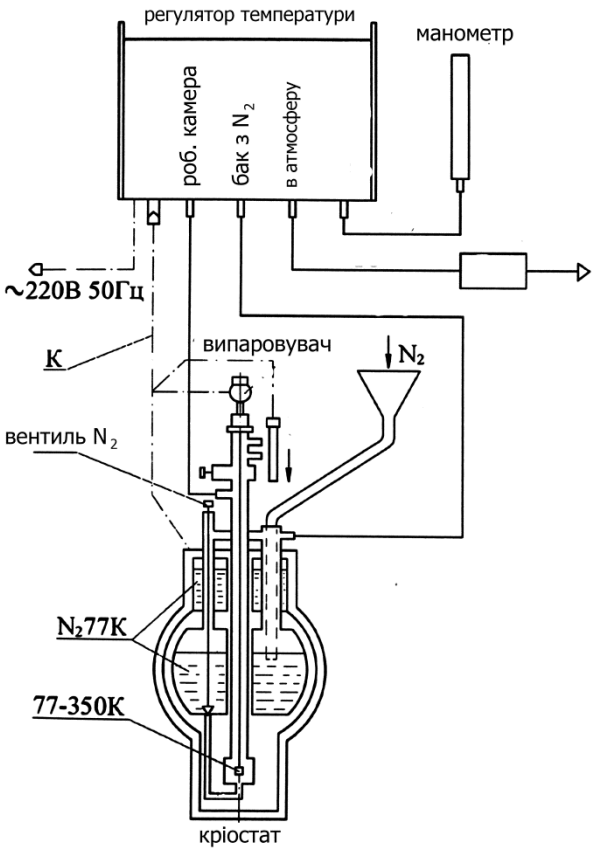

Рис 5.3 Схема підключення кріостату для роботи в діапазоні температур 77-350 К

Тримач зразка призначений для установки зразка в робочій камері кріостата і забезпечує проведення з ним низки маніпуляцій, необхідних для оптичних і спектральних досліджень кристалів у поляризованому світлі. Він дає змогу:

- орієнтувати зразок щодо площини поляризації;
- здійснювати вертикальне переміщення зразка;
- здійснювати кутове переміщення зразка щодо світлового пучка.

На тримачі зразк змонтовано додаткову пічку, що уможливлює підвищення точності стабілізації температури, а також існує можливість додаткового монтажу температурного датчика.

Основні характеристики температурного регулятора УТРЕКС К43

- Діапазон регуляції та стабілізації температури:
  - при використанні гелію: 4,2-350,0 К;
  - при використанні азоту: 77, 0- 350,0 К.
- Роздільна здатність відображення температури:
  - при $4{,}20 \le T \le 99{,}99$ 0,01 К;
  - при $100{,}0 \le T \le 350{,}0$ 0,1 К.
- Роздільна здатність відображення стабільності підтримки температури 0,001 К.

Регулятор температури є приладом інтелектуального типу із вбудованим мікропроцесором, в якому в якому виміряна напруга на германієвому термодіоді перетворюється у сигнали керування виконуючими підсистемами:

- електронагрівачами, встановленими в кріостаті;
- електромагнітним клапаном, вмонтованим в регулятор температури, що керує потоком кріоагенту через теплообмінник робочої камери кріостату.

Одночасне застосування обох систем забезпечують тепловий баланс в робочій камері кріостату та високу стабільність підтримки температури. Підтримка постійного тиску в баці з кріоагентом при роботі з рідким гелієм забезпечується за рахунок природнього теплопритоку, що забезпечує достатній рівень випаровування гелію. При роботі з рідким азотом для підтримки постійного тиску застосовується додатковий нагрівач (випаровувач). Цикл програмного алгоритму стабілізації температури складає 10 Гц. В кожному циклі стабілізації температури здійснюються наступні операції

- синхронне вимірювання температури на температурному сенсорі $U(T_R)$;
- накопичення заданого числа вимірювань та їх усереднення;
- перерахунок напруги $U(T_R)$ в значення фактичної температури T_R;
- обчислення різниці між заданою T_S та фактичною T_R температурами $\Delta T = T_S - T_R$;
- обчислення швидкості зміни фактичної температури $dT = \Delta T / \Delta t$;
- генерація сигналів управління відповідно до значень dT та ΔT.

Для перерахунку показів термодіода в значення температури використовуються калібрувальні дані, що записані в енергонезалежну пам'ять температурного регулятора. При заміні датчика існує можливість перезапису калібрувальних даних для забезпечення точності вимірювальної температури.

Хід роботи

1. Відкачати вакуумні порожнини кріостата і переливалок для рідкого азоту і гелію з використанням форвакуумного насосу до високого вакууму.
2. Приєднати кріостат до системи збору гелію і продути газоподібним гелієм робочі порожнини кріостата з метою усунення вологи.
4. Залити рідкий азот.
5. Витримати систему під азотом до охолодження кріостата не менш двох годин.
6. Приєднати переливний сифон до нижнього бачка кріостату ат ємності з рідким гелієм. Перевірити герметичність усіх з’єднань.
7. Приєднати посудину з рідким гелієм до кріостата і за допомогою гумового м’яча зробити заливку гелієвого бачка рідким гелієм відповідно до інструкції.
8. Після закінчення заливки від’єднати посудину і провести термостатування робочої камери кріостата згідно з вказівками в інструкції до УТРЕКС.
9. Отримати часову залежність зміни температури в кріостаті за допомогою програми запису даних з COM-порта.
10. Проаналізувати точність стабілізації температури за отриманим графіком.

Список літературних джерел

1. Уайт Г.К. Экспериментальная техника в физике низких температур. - М.: Физматгиз, 1961.— 231 с.
2. Регулятор температуры УТРЕКС К 43 // Руководство по эксплуатации.- К.: Институт физики НАН Украины, 2005. — 25 с.

Лабораторна робота 6

КАЛІБРУВАННЯ ВТОРИННИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ СЕНСОРІВ В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Мета роботи. Ознайомитися з особливостями використання температурний сенсорів в області низьких температур, провести калібрування вторинного термометра, отримати аналітичний вираз для обчислення температури відкаліброваного темометра та оцінити точність відтворення показів температури для нього.

Обладнання: азотний та гелієвий кріостати, посудини Дьюара, мідь–константанова термопара, напівпровідниковий температурний сенсор, температурний опоровий сенсор PT100

Теоретичні відомості

Термометр - це пристрій, за допомогою якого певну властивість матерії, що пов'язана фізичним поняттям "температура". Саме поняття "температура" визначається законами термодинаміки, при цьому вводиться термодинамічна шкала температур. Значення отриманої температури залежить від кількох факторів: фізичного явища, теорією опису цього явища, на якому ґрунтується саме вимірювання температури і точності цього вимірювання.

Загалом, термометри можна розділити на дві групи: первинні та вторинні термометри.

Первинні термометри дозволяють отримати значення термодинамічної температури безпосередньо з вимірювання, оскільки у теоретичний опис відповідного фізичного явища, що використовується для вимірювання, прямо входить термодинамічна температура і вони не потребують калібрування. Прикладами первинних термометрів є газові термометри (у них використовуючи співвідношення між тиском, об'ємом і температурою для газів), вимірювання швидкості звуку в газі, кулонівська блокада електронів у тунельних переходах, тепловий шум електричного резистора (за допомогою рівняння Найквиста), а також кутова анізотропія гамма-променів, що випускаються з радіоактивні ядра (використовуючи розподіл Больцмана з надтонкою структурою рівнів) Зазвичай первинна термометрія складна і використовується у спеціалізованих лабораторіях для стандартизації температурних вимірювань.

Вторинні термометри це термометри, які не дозволяють отримати термодинамічне значення температури безпосередньо з вимірювань. Як правило, такі термометри вимагають калібрування відносно первинних термометрів. Поряд з цим, вторинні термометри мають ряд переваг, часто набагато більш чутливі ніж первинні термометри, і зазвичай набагато зручніші у використанні. Тому вторинні термометри у переважній більшості і використовуються в науково-дослідних лабораторіях.

Вимоги до температурних сенсорів, що використовуються у вторинних термометрах:

- термометр повинен мати широкий діапазон робочих температур і повинен бути нечутливим до змін навколишнього середовища, (наприклад, зовнішнє магнітне поле);
- характеристика x, яку потрібно виміряти, повинна бути легко відтворювана;
- температурна залежність вимірюваного властивості $x(T)$ мусить бути виражена з допомогою відносно простого закону;
- чутливість $(\Delta x/x)/(\Delta T/T)$ повинна бути високою;
- температурний сенор має досягти термодинамічної рівноваги за якомога коротший час, як сам так і з навколишнім середовищем, температура якого вимірюється. Тому він мусить мати невелику теплоємність, хорошу

теплопровідність, а також хороший термічний контакт з оточенням. Особливо слід звернути увагу на проблему теплового контакту при температурних вимірюваннях $T \leq 1\ K$;

– відповідне вимірювання повинно вводити мінімум тепла у кріостат, щоб уникнути нагрівання термометра і його оточення. Ця проблема є надзвичайно важливою для наднизьких температур;

При виборі температурного сенсора потрібно врахувати той сенсор, який найбільше підходить для певного експерименту та діапазону температур при максимальній чутливості і мінімумі розсіяного тепла в кріостаті. На рисунку 6.1 зображено залежність відносної чутливості від температури для різних типів сучасних температурних сенсорів

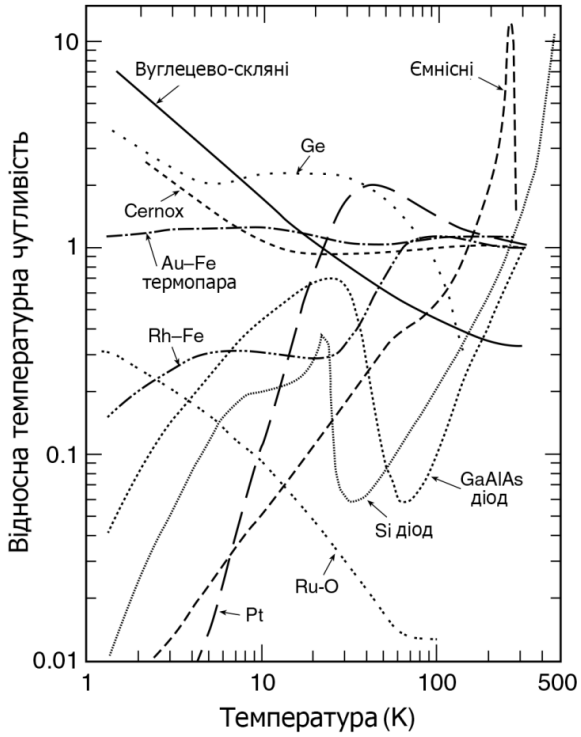

Рис. 6.1 Залежність відносної чутливості сенсора від температури для різних типів сучасних температурних сенсорів.

Як видно з рисунка 4.1 вибір сенсора для температурних вимірювань є нетривіальною задачею, при цьому для вимірювань температури в кріостаті у широкому діапазоні дуже часто використовується комбінація сенсорів, наприклад для діапазону 10-300 К можна використати платиновий опоровий термометр, а для діапазону температур 1-10 К напівпровідниковий сенсор на основі оксиду цирконію або оксиду рутенію.

Вимірювання температур у науково-дослідних кріогенних лабораторіях здійснюється різноманітними типами термометрів. Приведемо принцип дії деяких, найбільш поширених із них.

Опорові термометри

Принцип дії цих термометрів ґрунтується на явищі залежності опору сенсора від температури. При цьому в якості температурного сенсора можуть використовуватись чисті метали (та їх сплави) та напівпровідники.

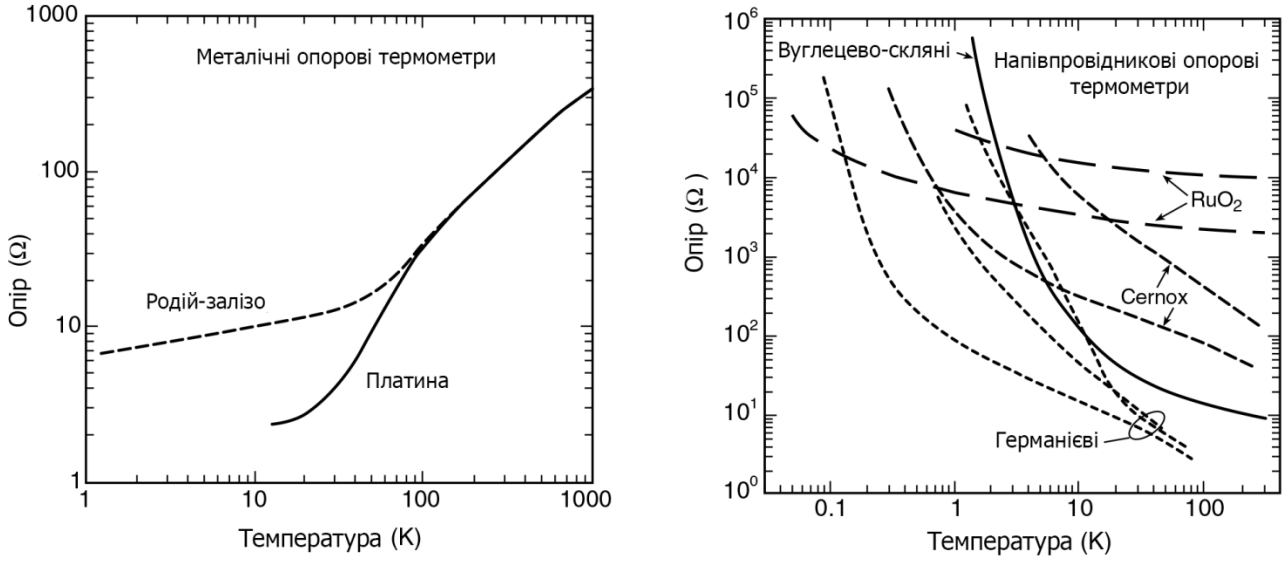

Рис 6.2 Температурна залежність опору для металічних та напівпровідникових сенсорів.

Металічні термодатчики виготовляються як з чистих металів (золото, платина, мідь), так і зі сплавів (залізо+родій). Вони виготовляються у вигляді дротини чи стрічки відповідного металу, що намотані на кварцовий каркас, який виконує роль електроізолятора. Для вимірювання опору таких температурних сенсорів використовуються чутливі омметри з можливістю обмежувати вимірювальний струм для уникнення перегріву сенсора, що може критично вплинути на температуру кріостату при низькотемпературних вимірюваннях.

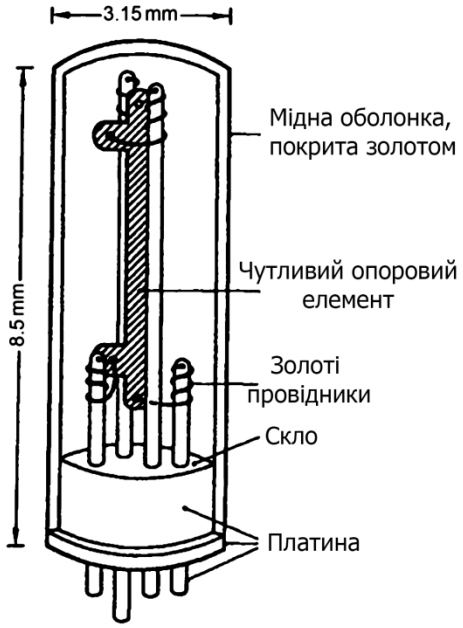

Рис 6.3 Типова конструкція опорового сенсора для температурних вимірювань з чотирьохточковим підключенням

Перевагою сенсорів такого типу є хороша відтворюваність показів температури та добра стабільність значень опору. Поряд з цим слід відзначити зменшення чутливості опорових металічних сенсорів для температурного діапазону вимірюваннях $T \leq 10\,K$. Для підвищення чутливості металічних термосенсорів у цьому діапазоні до основного металу додають невелику кількість магнітоактивних домішок (наприклад, залізо в кількості 0,5 %)

Напівпровідникові температурні сенсори є ефективнішими у використанні при низьких температурах за рахунок значно більшої чутливості у порівнянні з металічними. Принцип дії напівпровідникових сенсорів ґрунтується на збільшення опору напівпровідника при зменшенні температури. При високих температурах у напівпровідниках проявляється власна провідність, пов’язана з переходом електронів з валентної зони в зону провідності. Провідність є функцією числа носіїв заряду і їхньої рухливості. В області низьких температур провідність обумовлена присутністю домішок *n*- чи *p*- типу, модифікуючи кількість таких

домішок можна добитися збільшення чутливості напівпровідникового сенсора у заданому діапазоні низьких температур В загальному випадку залежність опору від температури для напівпровідника виражається співвідношенням:

$$R = R_0 e^{E_g/_{kT}} \tag{6.1}$$

До недоліків сенсорів на основі напівпровідника можна віднести погану відтворюваність при переході від одного екземпляра сенсора до іншого, тобто напівпровідникові опорові сенсори вимагають калібрування відносно первинних термометрів. При цьому накладається ряд обмежень, недотримання яких можуть порушити калібрування певного сенсора. Такими факторами можуть бути занадто велика швидкість зміни температури чи завеликий вимірювальний струм при отриманні значення опору сенсора.

Термоелектричні сенсори – термопари

Якщо кінці металевого провідника помістити у різні температури виникне електрорушійна сила, в результаті якої на кінцях провідника виникне електрична напруга. Для температурних вимірювань використовується термоелектрична сила між двома різними металами із з'єднанням при еталонній температурі, як правило, при 0° С щоб уникнути впливу контактів на вольтметрі (Рис. 6.3). Перевагами використання термопар є можливість виконати спай термопари дуже малим, практично точковим, що підвищує точність вимірювання температури та час відгуку датчика. Термопара практично не виділяє тепло при вимірюванні, що є великою перевагою для низькотемпературних вимірювань. Термоелектричний сенсор забезпечує також хорошу відтворюваність при циклічному охолодженні, а також у більшості випадків є нечутливих до зовнішнього магнітного поля.

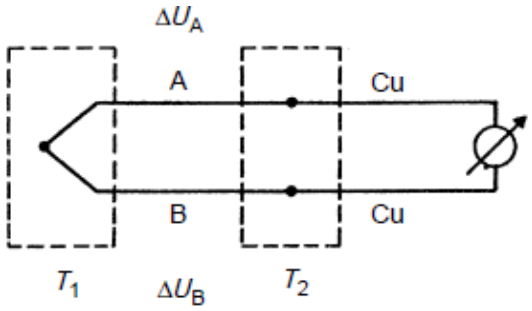

Рис 6.3 Схема підключення термопари для термоелектричної термометрії. Термоелектрична сила створюється на звареному з'єднанні між провідниками *A* і *B*, який знаходиться при температурі T_1. Обидва провідники підключені до мідних дротин, що ведуть до гальванометра.

Основним недоліком термопар є той факт, що значення термоелектричної сили прямує до "0" при T→0. На рисунку 6.4 показана залежність термоелектричної сили від температури для звичайної мідь-константанової термопари. Монотонне спадання до «0» термоелектричної сили характерне і для інших типів термопар. Для уникнення цієї проблеми розроблено нові надчутливі методики реєстрації слабої термолелектричної сили на основі квантових інтерферометрів (СКВІДів), що дають змогу зареєструвати слабкий сигнал навіть у мілікельвіновому діапазоні.

Інший спосіб збільшення чутливості термоелектричних сенсорів – додавання магнітних іонів заліза дуже малої концентрації: такі системи, як Au + 100 ppm Fe або Pd + 100 ppm Fe

дозволяють збільшити чутливість таких термопар і дозволяють проводити вимірювання температури звичайними методиками до 1 К. Практичною межею вимірювання температури з використанням термопар до мілікельвінового діапазону. Використання термоелектричної термометрії для низькотемпературних вимірювань є поширеним, коли потрібно отримати відносну зміну температури, не вносячи в експеримент додаткового тепла.

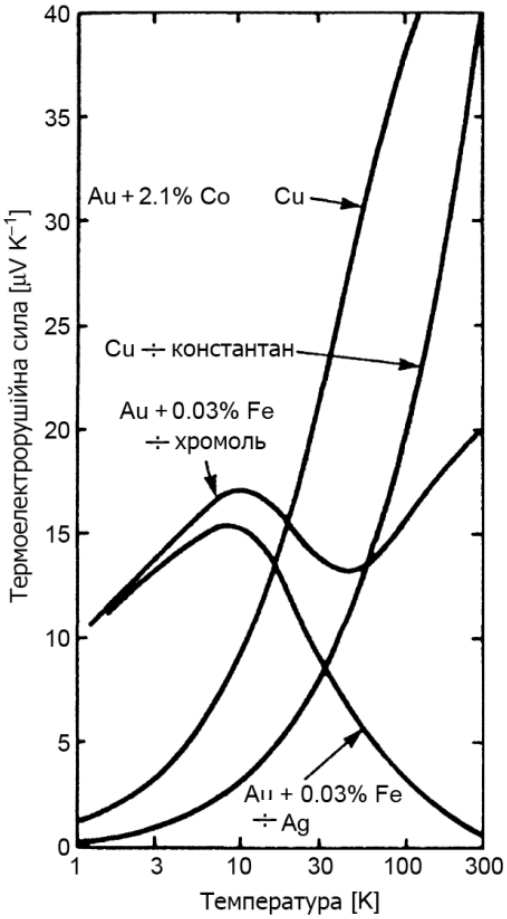

Рис. 6.4 Залежність термоелектрорушійної сили від температури для вибраних термопар.

Ємнісні термометри

Термометри, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні електричної ємності від температури знайшли широке застосування у фізиці низьких температур. До переваг таких сенсорів можна віднести відносну простоту вимірювання ємності конденсатора та набагато менше нагрівання самого датчика під час вимірювання. Також варто зазначити, що ємнісні вимірювання можна провести з дуже високою точністю, яка буде вищою у порівнянні з опоровими сенсорами при тих самих рівнях розсіяння електричної енергії. Зазвичай, параметром, що міряється при зміні температури є діелектрична проникність. Як матеріал для виготовлення конденсатора такого сенсора використовуються аморфні ті склоподібні матеріали, в яких спостерігається значна зміна діелектричної проникності до мілікельвінового діапазону температур. Ще одною перевагою ємнісних температурних сенсорів є нечутливість їхніх

показів до впливу зовнішнього магнітного поля. Як матеріал для виготовлення таких термометрів використовують скло-кераміку $SrTiO_3$, неспівмірний кристал $(Pb_{0.45}Sn_{0.55})_2P_2Se$, кварцове скло. Недоліком ємнісних сенсорів є низька відтворюваність при охолодженні до дуже низьких температур, що вимагає періодичної калібрації такого сенсора. На сьогоднішній день ємнісні сенсори успішно використовуються в кріостатах, де досліджуються властивості матеріалів під впливом сильних магнітних полів, що можуть досягати величини 18 Тл.

Хід роботи

Градуювання напівпровідникового сенсора та нововиготовленої мідь-константанової термопари відносно датчика PT100:

1. Закріпити досліджувані сенсори та датчик PT100 на тримач штоку кріостата.
2. Опустити шток в термокомірку кріостата, перевірити чи провідники до досліджуваних сенсорів не дотикаються до металевих частин кріостата.
3. Під'єднати виходи досліджуваних датчиків до автоматизованої системи вимірювання опору.
4. Запустити програму в режимі охолодження, розрахувавши час експерименту та діапазон температур із забезпеченням швидкості зміни температри 0,5 К на хвилину.
5. На протязі експерименту слідкувати за потужністю, що подається на випаровував рідкого азоту в посудині Дьюара, при недостатній потужності охолодження збільшити напугу на випаровувачі на 30-40 %
6. Записати отримані дані у файл даних, ввімкнути програму регуляції температури на нагрівання.
7. Побудувати залежності опору від температури для досліджуваних температурних сенсорів та провести фітування отриманих залежностей поліномом сьомого ступеню.
8. Оцінити у відсотках відхилення аналітичної функції отриманих відкаліброваних датчиків від експериментальних даних

Список літературних джерел

1. *Pobell F.* Matter and Methods at Low Temperatures. - Springer-Verlag: Berlin Heidelberg 2007, 461 p.
2. *Логвиненко С.П., Россошанский О.А., Потупчик А.Е.* Термометры для низких температур ПТЭ.— 1976.— № 6.— С. 238.
3. *Ekin J. W.* Experimental techniques for low-temperatures measurements.- Oxford University Press 2006, 346 p.

Лабораторна робота 7

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ І ПРИНЦИПІВ РОБОТИ КРІОКУЛЕРА ЗАКРИТОГО ТИПУ ADVANCED RESEARCH SYSTEM.

Мета роботи: ознайомлення з принципом роботи холодильної установки (кріокулера) закритого типу, отримання навичок управління температурою за допомогою температурного регулятора CryoCon 32.

Прилади та матеріали: кріокулер замкнутого типу Advanced Research System, регулятор температури CryoCon 32, турбомолекулярний насос Pfeiffer, ,балон зі стиснутим гелієм, допоміжні прилади і матеріали.

Теоретичні відомості

Останні роки значно зросло зацікавлення до холодильних машин замкненого циклу малої холодопотужності – т. зв. кріокулерів.

Основні напрямки застосування кріокулерів:

1. Кріовідкачування для отримання вакууму високої чистоти (напівпровідникова індустрія, симуляція космічних умов, прискорювачі елементарних частинок);
2. Охолодження детекторів (інфрачервоні детектори для спостереження Землі, прилади нічного бачення, системи наведення, детектори гамма-випромінювання ін.);
3. Охолодження електронних компонент чи приладів, що містять надпровідні матеріали: (SQUID, контакти Джозефсона, надпровідні магніти);
4. Охолодження зразків у фізиці;
5. Охолодження термічних екранів реконденсація кріорідин, медичні системи візуалізації на основі магнеторезонансу.

Типова холодопотужність кріокулерів визначається їх застосуванням і становить від кількох ват при температурах 4 К до кількох десятків ват при температурах 80 К.

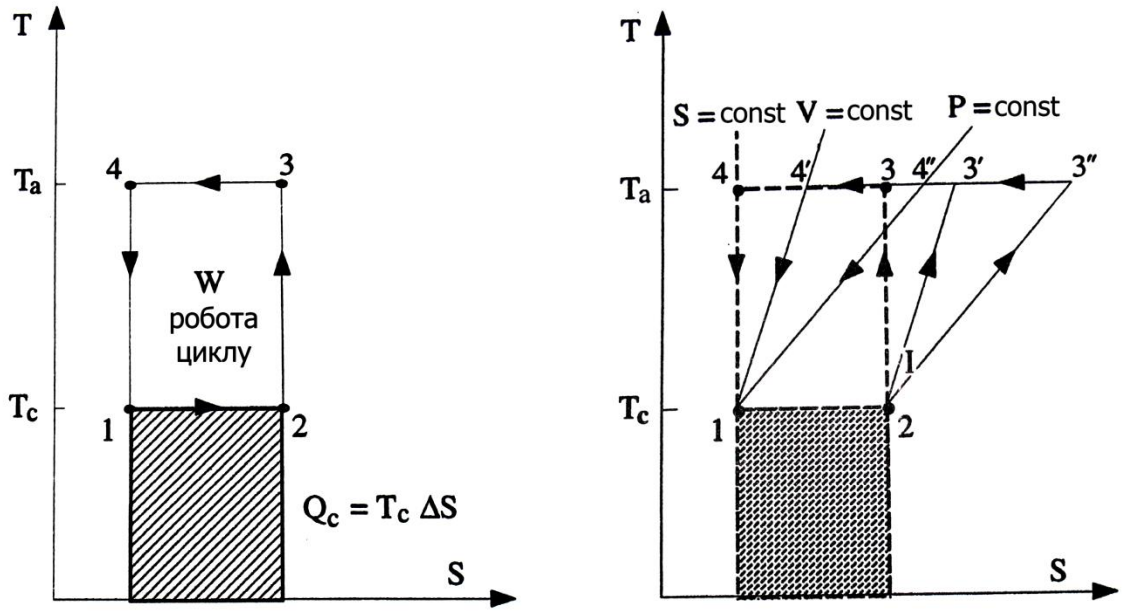

Рис 7.1. Представлення циклу Карно та модифікованих циклів Карно в координатах температура-ентропія.

Розглянемо загальний термодинамічний опис процесу охолодження холодильної машини. Для того, щоб охолодити внутрішню частину кріокулера потрібно відвести теплоту Q_c при холодній температурі T_c. Теплота Q_c є сумою таких доданків:

- внутрішня неефективність кріокулера,
- теплопритік через деталі кріостату (в переважній більшості - металічні),
- теплопритік залишкового газу через об'єм, що виконують роль тепло ізолятора,
- електромагнітне випромінювання із навколишнього середовища,
- тепло, що генерується температурними сенсорами та електронними компонентами,
- тепло що утворюється внаслідок дисипації енергії під час експерименту,

Для відведення певної кількості теплоти з внутрішньої частини кріостату потрібно виконати певну роботу W_c, яка буде прикладена до робочого газу кріокулера в замкнутому циклі. При цьому у зовнішнє середовище розсіється певна кількість тепла Q_a, що буде визначатися

$$Q_a = Q_c + W_c \tag{7.1}$$

Ефективність або коефіцієнт корисної дії такого кріокулера буде визначатися як

$$\eta = \frac{Q_c}{W_c} \tag{7.2}$$

Максимальний ККД, як відомо має цикл Карно, див. рис 7.1 (а) Заштрихована область на обох рисунках визначає кількість теплоти яка відводиться від менш нагрітого тіла визначається співвідношенням

$$Q_c = T_c \Delta S \tag{7.3}$$

Якщо прийняти, що температура оточуючого середовища рівна $T_c = 300$ К, то ККД для циклу Карно буде наступним:

T_c	80 К	20 К	4 К
η	0,364	0,0701	0,014

Як видно з приведеної таблиці, ефективність охолодження при низьких температурах для циклу Карно є дуже низькою, що утруднює його практичне використання, крім того існують певні технологічні обмеження компресорної техніки на етапах стискання робочого газу при підвищеній температурі. Для уникнення цієї проблеми адіабатичні ділянки класичного зворотнього циклу Карно заміняються на ізохорні (цикл Стірлінга) або ізобарні (цикл Ерріксона) – Рис. 7.1 При цьому точки циклу 3 і 4 замінюються відповідно новими точками 3′ і 3″ а також 4′ і 4″. Як видно з діаграми, в наслідок введення ізохорних та ізобарних ділянок, на цих етапах циклу від робочого газу необхідно відвести а потім надати йому певну кількість тепла. Для здійснення теплопередачі використовується додатковий теплообмінник підвищеної ефективності, що називається регенератором.

Одним з прикладів кріокулера, що працює на основі ізобаричного циклу Еріксона – кріокулер Гіффорда-МакМагона (Рис. 7.2).

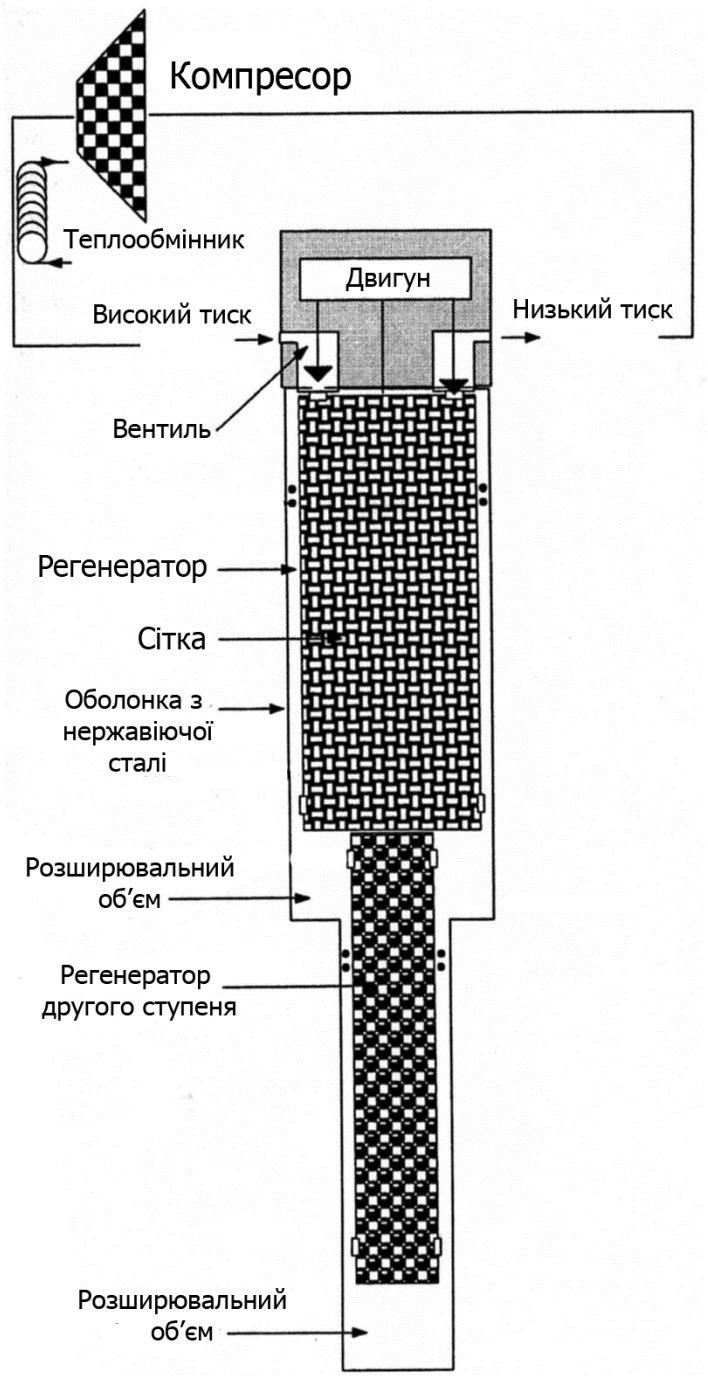

Рис.7.2 Схема кріокулера Гіффорда-МакМагона.

Це двоступеневий кріокулер з температурою першого ступеня охолодження 70 К, температура другого ступеня охолодження опускається до 8-9 К. Кріокулер складається зі сталевої оболонки, що поміщена в вакуумну камеру для теплоізоляції від зовнішнього середовища, двох регенераторів, системи вентилів, що приводяться в рух за допомогою двигуна в верхній частині кріокулера, компресора, додаткового теплообмінника та ситеми вакуумних труб високого та низького тисків для передачі і відведення гелію в робочій частині кріокулера. Система регуляції

дозволяє почергово відкривати та закривати вентилі високого та низького тиску в залежності від фази роботи кріокулера. На рис. 7.3 зображена 4 фази роботи кріокулера Гіффорда-МакМагона.

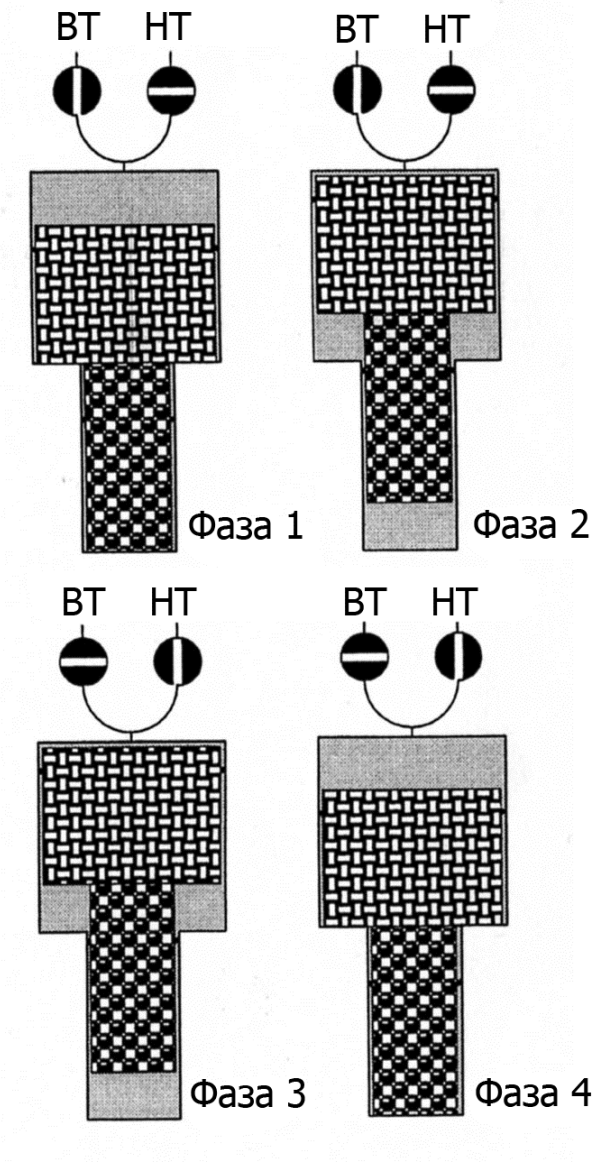

Рис. 7.3 Фази роботи кріокулера Гіффорда-МакМагона.

Фаза 1. Регенератор у нижньому положенні. Вихідний вентиль закритий, вхідний вентиль відкритий. Газ під високим тиском заповнює регенератор і об’єм над регенератором при кімнатній температурі.

Фаза 2. Вихідний вентиль закритий, вхідний вентиль залишається відкритим. Регенератор рухається у верхнє положення. Газ проходить через регенератор та ізобарично охолоджується з допомогою матриці регенератора, після чого заповнює простір під регенератором. При цьому температура газу понизилася.

Фаза 3. Регенератор у верхньому положенні. Вихідний вентиль відкривається, вхідний вентиль закритий. Газ в регенераторі і «холодному» об’ємі піддається розширенню ізотермічно. Система при цьому поглинає певну кількість тепла.

Фаза 4. Вихідний вентиль залишається відкритим, вхідний вентиль закритий. Регенератор рухається в нижнє положення. Газ при низькому тиску проходить через регенератор, ізобарично нагрівається матрицею регенератора до кімнатної температури.

Хід роботи:

1. Ознайомитися з інструкцією запуску кріокулера *Advanced Research System*.
2. Отримати високий вакуум в термоізоляційному об'ємі кріокулера за допомогою турбомолекулярного насоса.
3. Задати режим зміни температури на температурному регуляторі.
4. Отримати часову залежність зміни температури другого ступеня кріокулера та отримати найнижчу температуру в межах 8 - 9 К.
5. Після стабілізації найнижчої температури провести відігрів кріокулера.

Список літератури:

1. Інструкція запуску кріокулера *Advanced Research System.*
2. Ekin J. W. Experimental techniques for low-temperatures measurements.- Oxford University Press 2006, 346 p.
3. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б.- Справочник по физико-техническим основам криогеники. Энергоатомиздат: Москва, 1985, 432 с.
4. Pobell F. Matter and Methods at Low Temperatures.- Springer-Verlag: Berlin Heidelberg 1992, 319 p.

ЗМІСТ

Лабораторна робота 1
ВИВЧЕННЯ ТЕХНІКИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОГО ВАКУУМУ_____3

Лабораторна робота 2
ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ ВІДКАЧУВАННЯ ПАРІВ РІДКОГО ХОЛОДОАГЕНТУ_____8

Лабораторна робота 3
ОХОЛОДЖЕННЯ І ЗРІДЖЕННЯ КРІОГЕННИХ ГАЗІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИКЛУ КАРНО_____13

Лабораторна робота 4
РОЗДІЛЕННЯ КРІОГЕННИХ ГАЗІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ЗРІДЖЕНОГО ПОВІТРЯ_____17

Лабораторна робота 5
ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ГЕЛІЄВОГО КРІОСТАТУ ТА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СИСТЕМИ УТРЕКС К43_____24

Лабораторна робота 6
КАЛІБРУВАННЯ ВТОРИННИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ СЕНСОРІВ В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР_____28

Лабораторна робота 7
ВИВЧЕННЯ БУДОВИ І ПРИНЦИПІВ РОБОТИ КРІОКУЛЕРА ЗАКРИТОГО ТИПУ ADVANCED RESEARCH SYSTEM _____34