

ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України

Електронні видання



**В.К. ЧАГОВЕЦЬ
С.С. СОКОЛОВ**

**ОСНОВИ
ФІЗИКИ І ТЕХНІКИ
НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР:
І. ФІЗИЧНІ МЕТОДИ
ОДЕРЖАННЯ
НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР**



ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
ім. Б.І. ВЕРКІНА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

В.К. ЧАГОВЕЦЬ, С.С. СОКОЛОВ

**ОСНОВИ ФІЗИКИ І ТЕХНІКИ
НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР:**

**І. ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ОДЕРЖАННЯ
НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Харків
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України
2024

УДК 538.9
Ч 12

Чаговець В.К., Соколов С.С. **Основи фізики і техніки низьких температур.**

I. Фізичні методи одержання низьких температур Навчальний посібник. — Харків: ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, 2024. — 169 с.

ISBN 978-617-95455-7-3

У посібнику розглянуті термодинамічні основи охолодження речовини, холодильні цикли й методи досягнення температур нижче 1 К.

Аналізуються фізичні процеси, що приводять до зрідження реальних газів. Наведені відомості про основні фізичні властивості хладогентів і конструкційних матеріалів, а також методах розрахунку теплових притоків у кріостатах для одержання низьких і наднизьких температур. Викладені основні відомості щодо методів отримання температур, нижчих ніж температура скраплення гелію. Розглянуті проблеми низкотемпературної термометрії, температурні шкали, що існують, основні методи та засоби термометрії.

Для студентів старших курсів та аспірантів зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія», наукових працівників.

Рецензенти:

С.І. Бондаренко, доктор техн. наук, професор, ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України
О.В. Долбин, доктор фіз.-мат. наук, професор, ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України

Рекомендовано до друку Вченою радою

Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України
(протокол № 4 від 10.07.2024 р.)

Видавництво ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України

ISBN 978-617-95455-7-3

© В.К. Чаговець, С.С. Соколов, 2024

© О.М. Калиненко, Р.М. Баснукаєва,
художнє оформлення, 2024

© ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України, 2024

ЗМІСТ

1. Вступ.....	4
2. Фізичні основи зрідження реальних газів.....	7
2.1. Ідеальний газ та його характеристики.....	7
2.2. Рівняння ван дер Ваальса і можливість зрідження реальних газів.....	10
2.3. Метод дроселювання (ефект Джоуля –Томсона)	16
2.4. Адіабатичне розширення газу із здійсненням зовнішньої роботи.....	25
3. Основні типи конструкцій зріджувачів газів.....	27
3.1. Парокомпресійний рефрижератор	27
3.2. Каскадний метод зрідження газів	28
3.3. Методи Гемпсона і Лінде.....	29
3.4. Метод Клода.....	31
3.5. Турбодетандер Капиці.....	33
3.6. Зріджувачі водню та гелію.....	36
4. Головні типи холодильних систем	43
4.1. Механічні рефрижератори	43
4.2. Концепція простої розширювальної охолоджувальної машини	44
4.3. Технічна реалізація розширювальної машини	46
4.4. Регенеративні теплообмінники	46
4.5. Рефрижератор Стірлінга	47

4.6. Рефрижератор Гіффорда-Макмагона.....	52
4.7. Рефрижератори на імпульсних трубках (ІТ-рефрижератори, ІТР)	55
4.8. ІТР типу Стірлінга з однією діафрагмою	56
4.9. Два методи стиснення газу в ІТР	58
5. Пристрої для зберігання кріогенних рідин та проблема теплових притоків	63
5.1. Порошково-вакуумна та екранно-вакуумна ізоляції	63
5.2. Конструкції посудин Дьюара для кріогенних рідин	66
5.3. Джерела теплопритоків до елементів кріостату та до досліджуваного зразка	70
6. Кріостати випаровування ^4He та ^3He	83
6.1. Початковий етап охолодження.....	87
6.2 Кріостати для $T > 5 \text{ K}$	89
6.3. Кріостат випаровування ^4He безперервної дії	91
6.4. Кріостати випаровування з ^3He	95
6.5. Кріостати випаровування ^3He з зовнішніми насосами	96
6.6. Кріостати випаровування ^3He , що містять внутрішні адсорбційні насоси	100
7. Методи отримання наднизьких температур	104
7.1. Рефрижератори розчинення ^3He в ^4He	104

7.2. Метод адіабатичної кристалізації ^3He . Ефект Померанчука	111
7.3. Метод адіабатичного розмагнічування парамагнітних солей.....	116
7.4. Метод ядерного розмагнічування	121
7.5. Ядерне охолодження за допомогою ван- флеківських парамагнетиків	124
8. Низькотемпературна термометрія	127
8.1. Методи зіставлення температурних шкал.....	132
8.2. Термометри для вимірювання низьких температур	133
8.3. Газова термометрія	135
8.4. Інші типи термометрів	142
8.5. Термометрія, заснована на залежності тиску плавлення ^3He від температури (кристалізаційні термометри).....	147
8.6. Магнітна термометрія	151
8.7. Шумова термометрія	157
ДОДАТОК. Основні характеристики кріогенних рідин	159