

Предисловие	10
Предисловие редактора перевода	11

Часть I

Глава 1. Вакуумная техника	14
1.1. Введение	14
1.2. Давление насыщенных паров	16
1.3. Средняя длина свободного пробега молекул и вязкость	17
1.4. Течение газа	18
1.4.1. Проводимость отверстия и трубопровода для молекулярного течения	19
1.4.2. Проводимость отверстий и трубопроводов для вязкостного режима откачки	20
1.5. Откачка больших объемов	21
1.6. Вакуумные насосы	22
1.6.1. Пластинчато-роторный механический насос с масляным уплотнением	22
1.6.2. Бустерные насосы	24
1.6.3. Спиральные насосы	25
1.6.4. Сорбционные насосы	26
1.6.5. Масляные диффузионные насосы	26
1.6.6. Турбомолекулярные насосы	29
1.6.7. Молекулярные насосы	30
1.7. Другие вакуумные узлы	31
1.8. Измерители давления	33
1.8.1. Измерители полного давления	34
1.8.2. Манометр Мак-Леода	34
1.8.3. Пружинный манометр	35
1.8.4. Мембранный манометр	35
1.8.5. Вакуумметры теплопроводности	35
1.8.6. Ионизационные вакуумметры с нитью накала	36
1.8.7. Вакуумметры с холодным катодом	38
1.9. Измерение парциальных давлений	38
1.9.1. Течеискатели	38
Литература	39

Часть II

Глава 2. Криогенные жидкости	41
2.1. Криогеника: Введение и история	41

2.2. Криогенные жидкости	44
2.2.1. Жидкий кислород и жидкий водород	44
2.2.2. Жидкий азот	47
2.2.3. Жидкий гелий	47
2.2.4. Физика гелия	49
2.2.4.1. Давление паров гелия и удельная теплота испарения	49
2.2.4.2. Теплоемкость гелия	51
2.2.4.3. Явления переноса в жидком ^4He : теплопроводность и вязкость	54
Литература	56
Глава 3. Свойства твердых тел при низких температурах	59
3.1. Введение	59
3.2. Молярная теплоемкость	59
3.3. Теплоемкость кристаллической решетки	60
3.4. Электронная теплоемкость	62
3.5. Теплоемкость металлических сверхпроводников	63
3.6. Магнитная теплоемкость	65
3.7. Теплоемкость аморфных материалов	70
3.8. Справочные данные по теплоемкости	72
3.9. Тепловое расширение	75
3.10. Теплопроводность	77
3.10.1. Фононы	78
3.10.2. Электронная теплопроводность	82
3.11. Металлические сверхпроводники	84
3.12. Справочные данные по теплопроводности при низких температурах	87
3.13. Закон Видемана–Франца	87
Литература	88
Глава 4. Перенос тепла и теплоизоляция	93
4.1. Введение	93
4.2. Выбор материалов с подходящей теплопроводностью	93
4.3. Тепловые ключи	96
4.3.1. Газовые тепловые ключи	96
4.3.2. Сверхпроводящие тепловые ключи	97
4.3.3. Другие тепловые ключи	97
4.4. Граничное тепловое сопротивление	98
Литература	104
Часть III	
Глава 5. Охлаждение до 0,3 К	108
5.1. Введение	108
5.2. Сосуды для хранения и перевозки криогенных жидкостей	109
5.3. Жидкий ^4He в криостатах	109
5.3.1. Фаза охлаждения	109
5.3.2. Хранение при постоянной температуре	110
5.3.2.1. Теплоподвод по стенкам	110
5.3.2.2. Радиационный теплоперенос	111
5.3.2.3. Теплоподвод по остаточному газу	113
5.3.2.4. Термоакустические колебания	113

5.4. Криостаты на основе ^4He	114
5.4.1. Криостаты для $T > 4,2\text{ K}$	115
5.4.2. Криостаты для области температур $1,3\text{ K} < T < 4,2\text{ K}$	115
5.5. Криостаты с жидким ^3He	116
5.5.1. Рефрижераторы с ^3He и внутренним сорбционным насосом	117
5.6. Вспомогательное оборудование	119
5.6.1. Трубопроводы для жидкого азота	119
5.6.2. Трубопроводы для ^4He	119
5.6.3. Датчики уровня жидкости	120
5.7. Механические рефрижераторы	121
5.7.1. Введение	121
5.7.2. Установки с противопоточными теплообменниками	122
5.7.2.1. Перепад давления	122
5.7.2.2. Теплопередача	123
5.7.2.3. Эффективность и длина теплообменника	123
5.7.2.4. Конструкции теплообменников	124
5.7.2.5. Другие конструктивные особенности ожижителей	125
5.7.3. Гелиевый ожижитель Коллинза	125
5.7.4. Цикл Клименко	126
5.7.5. Ожижители с турбодетандером	128
5.7.6. Цикл Брайтона	128
5.7.7. Холодильные устройства, использующие регенеративные теплообменники	129
5.7.8. Цикл Филлипса–Стирлинга	129
5.7.9. Рефрижераторы Гиффорда–Макмагона (ГМ)	131
5.8. Рефрижераторы на импульсных трубках (ИТ-рефрижераторы, ИТР)	132
5.8.1. Введение	132
5.8.2. Два метода сжатия газа в ИТР	134
5.8.3. Упрощенный принцип действия ИТР	135
5.8.4. Холодопроизводительность ИТР	137
5.8.5. Многоступенчатые ИТР	139
Литература	139
Глава 6. Рефрижераторы растворения	142
6.1. Введение	142
6.2. Свойства жидкой смеси ^3He и ^4He	143
6.3. Классический РР	145
6.4. Рефрижераторы растворения на основе эффекта Джоуля–Томсона	151
6.5. Практические советы при работе с РР	154
6.6. Рефрижераторы растворения для работы в сильных магнитных полях	155
6.7. «Сухие» РР	156
6.8. Использование РР в условиях невесомости	157
Литература	157
Глава 7. Другие рефрижераторы	159
7.1. Введение	159
7.2. Рефрижераторы на основе эффекта Померанчука	159
7.2.1. Необычное поведение ^3He	160
7.3. Рефрижераторы адиабатического размагничивания (АРР)	163

7.4. Ядерное адиабатическое размагничивание	165
7.5. Рефрижераторы с электронным охлаждением	166
Литература	166

Часть IV

Глава 8. Температурные шкалы и реперные точки	168
8.1. Введение	168
8.2. Эталонные реперные точки	170
8.3. Шкала МШТ-90 (ITS-90)	172
8.4. Предварительная низкотемпературная шкала ПНТШ 2000 (PLTS 2000)	175
8.5. Эталонные приборы для получения реперных температур NBS-SRM 767а, 768 и SRD 1000	177
8.6. Приложение: таблица температур сверхпроводящих переходов; влияние примесей и магнитного поля	179
Литература	182
Глава 9. Низкотемпературная термометрия	183
9.1. Введение	183
9.2. Газовая термометрия	184
9.2.1. Газовые термометры постоянного объема (ГТПО)	184
9.2.2. Акустические газовые термометры (АГТ)	186
9.2.3. Термометры, основанные на измерении диэлектрической постоянной газа (ГТДП)	186
9.3. Термометры, основанные на измерении давления насыщенного пара	187
9.4. Термометрия, основанная на зависимости давления плавления ^3He от температуры	189
9.5. Термопарные термометры	191
9.6. Резистивная термометрия	192
9.6.1. Металлические резисторы	192
9.6.2. Полупроводниковые и угольные термисторы. Термисторы на оксидах металлов	193
9.6.2.1. Резисторы из допированного германия	194
9.6.2.2. Угольные резисторы	194
9.6.2.3. Толсто пленочные RuO_2 -резисторы	195
9.6.2.4. Резисторы из оксинитрида циркония	196
9.6.2.5. Контактные диоды	197
9.6.3. Типичные проблемы и ошибки в резистивной термометрии	197
9.7. Шумовая термометрия	200
9.8. Емкостная термометрия, основанная на измерении диэлектрической проницаемости	201
9.9. Магнитная термометрия, основанная на зависимости восприимчивости парамагнитной соли от температуры	203
9.10. Термометрия, основанная на измерении степени анизотропии γ -излучения радиоактивных ядер в магнитном поле (ядерный ориентационный термометр)	204
9.11. Магнитная термометрия, использующая ядерный парамагнетизм	207
9.12. Термометрия на кулоновской блокаде	208
Литература	209

Глава 10. Оборудование для криогеники	213
10.1. Магниты	213

10.1.1. Сверхпроводящие магниты	213
10.1.2. Провода для сверхпроводящих магнитов	214
10.1.3. Параметры магнитов	214
10.1.4. Режим незатухающего тока	215
10.1.5. Источники питания для магнитов	216
10.2. Радиочастотное экранирование и фильтрация	216
10.2.1. Электрические и магнитные поля	216
10.2.2. Сверхпроводящие экраны	217
10.2.3. Электромагнитные фильтры	217
10.3. Мосты	218
10.4. Синхронный демодулятор	219
10.5. Контроль температуры	224
10.6. Малошумящие охлаждаемые усилители	226
Литература	228

Часть V

Глава 11. Измерения свойств твердых тел при низких температурах	229
11.1. Введение	229
11.2. Измерения теплопроводности	229
11.3. Измерение теплопроводности сплавов A6061-T6 и A1050 в диапазоне температур 4,2–77 К	233
11.3.1. Введение	233
11.3.2. Эксперимент и результаты	233
11.4. Теплопроводность меди при сверхнизких температурах	236
11.4.1. Введение	236
11.4.2. Эксперимент	236
11.4.3. Результаты измерений	238
11.5. Измерения коэффициента теплопроводности торлона	240
11.5.1. Введение	240
11.5.2. Теплопроводность торлона 4203 в диапазоне температур 0,08–5 К	241
11.5.3. Теплопроводность торлона 4203 в диапазоне 4,2–300 К	243
11.5.3.1. Сравнение мощности, подводимой к образцу, с паразитным теплоподводом	246
11.5.3.2. Тепловые контакты к образцу	246
11.5.3.3. Оценка погрешностей	247
Литература	247
Глава 12. Измерения теплоемкости	249
12.1. Введение	249
12.2. Методы измерений	249
12.2.1. Техника тепловых импульсов	249
12.2.2. Калориметрия на переменном токе	251
12.2.3. Метод релаксации	251
12.2.4. Метод двойного наклона	251
12.2.5. Метод модуляции температуры термостата	252
12.2.6. Ограничения методов измерений	252
12.3. Пример «классической» установки для измерения теплоемкостей	252
12.4. Теплоемкость монокристалла TeO ₂ в температурном диапазоне 0,06–0,28 К	253

12.4.1. Тепловая связь между образцом и термостатом	255
12.4.2. Измерения теплоемкости	256
12.4.3. Результаты	257
12.5. Теплоемкость торлона в диапазоне 0,15–4,2 К	258
12.5.1. Методика эксперимента	258
12.5.2. Результаты	259
12.5.3. Обсуждение	261
12.6. Измерение теплоемкости NTD Ge-терморезисторов	262
12.6.1. Введение	262
12.6.2. Процесс приготовления NTD-термометров	262
12.6.3. Методика эксперимента	263
12.6.4. Результаты	265
12.6.5. Обсуждение	266
Литература	268
Глава 13. Измерения коэффициента теплового расширения	270
13.1. Введение	270
13.2. Простой интерферометрический dilatометр	271
13.3. Тепловое расширение торлона в диапазоне 4,2–295 К	273
Литература	275
Глава 14. Практические, промышленные и космические применения криогеники	277
14.1. Введение	277
14.2. Применение криогенных жидкостей в промышленности и технике	277
14.3. Биологические и медицинские приложения	278
14.4. Космическая криогеника	279
14.5. Охлаждаемая электроника	282
Литература	284
Глава 15. Низкотемпературные детекторы	286
15.1. Введение	286
15.2. Криогенные сенсоры	287
15.2.1. Резистивные сенсоры	288
15.2.1.1. NTD Ge-сенсоры	288
15.2.1.2. Электрические контакты	289
15.2.1.3. Распад носителей (электрон–фонон)	290
15.2.2. TES (сенсоры на ширине перехода)	292
15.3. Примеры криогенных детекторов	294
15.3.1. Калориметры	294
15.3.2. Модель детектора CUORICINO	294
15.4. Инфракрасные болометры	298
15.4.1. Упрощенный расчет отклика болометра	300
15.4.1.1. Пример: конструкция и реализация инфракрасного болометра для работы при температуре 0,4 К	301
15.4.1.2. Компоненты болометра	302
15.4.1.3. Замечания об ИК-фильтрах	303
Литература	304



Глава 16. Крупные криогенные эксперименты	307
16.1. Введение	307
16.2. Гравитационные волны	310
16.2.1. Детекторы гравитационных волн	312
16.2.1.1. Введение	312
16.2.1.2. Массивные резонансные детекторы и резонансные преобразователи	313
16.3. Гравитационная антенна MiniGRAIL	315
16.3.1. Криогеника для MiniGRAIL	317
16.4. Нейтринная физика	319
16.4.1. Эксперимент DBD	320
16.5. Эксперимент CUORE	321
16.6. CUORICINO	325
Литература	329