

## OBSAH

1.0 ÚVOD	7
1.1 Aplikace kryogenní techniky	10
1.2 Stručná historie kryogenní techniky	10
1.3 Klasifikace chladicích soustav v kryogenní technice	12
2.0 VLASTNOSTI LÁTEK POUŽÍVANÝCH V KRYOGENNÍ TECHNICE	13
2.1 Dusík	15
2.2 Kyslík	15
2.3 Argon	15
2.4 Neon	15
2.5 Krypton	16
2.6 Xenon	16
2.7 Ozón	16
2.8 Fluor	16
2.9 Vodík	16
2.10 Metan	17
2.11 Helium	18
2.11.1 Helium $^4\text{He}$	18
2.11.2 Helium $^3\text{He}$	19
2.11.3 Aplikace supratekutého $^4\text{He}$ v CERN	20
3.0 TERMODYNAMICKÉ ZÁKLADY	21
3.1 Diagramy reálných látek	25
3.2 Základní termodynamické změny pro dosažení kryogenních teplot	26
3.3 Změna termodynamických veličin při kompresi reálného plynu	26
3.4 Expanze bez konání vnější práce	28
3.5 Expanze s konáním vnější práce	32
3.6 Porovnání adiabatické expanze s konáním a bez konání vnější práce	34
3.7 Nerovnovážná expanze	36
3.8 Vlnová expanze plynu	39
3.9 Snížení teploty syté kapaliny odčerpáním par	41
4.0 IDEÁLNÍ POROVNÁVACÍ OBĚHY	42
4.1 Idealizovaný oběh pro udržování stálé teploty	43
4.2 Ochlazování látek nebo předmětů	44
4.3 Zkapalňování	45
5.0 OBĚHY KRYOGENNÍCH ZAŘÍZENÍ	46
5.1 Lindeův (Hampsonův) oběh	48
5.2 Lindeův oběh s předchlazením	52
5.3 Lindeův oběh s cirkulací vysokotlakého plynu	55
5.4 Kaskádní oběhy	57
5.5 Vícekomponentní směs jako pracovní látka v okruhu	58
5.6 Oběhy využívající expanze s konáním vnější práce	61
5.7 Kombinované oběhy středotlaké a vysokotlaké	62
5.8 Kombinovaný oběh nízkotlaký	66
5.9 Modifikace kontinuálních kryogenních oběhů	67
5.10 Hodnoty některých parametrů u reálných oběhů (kontinuálních)	68
5.11 Stirlingův oběh	69
5.12 Gifford-McMahonův oběh	77
5.13 Vuilleumier-Taconisův oběh	82
5.14 Pulzní trubice	84
5.15 Materiály ze vzácných zemí	85
6.0 DETANDÉRY KRYOGENNÍCH ZAŘÍZENÍ	86

6.1	Pístové detandéry	86
6.2	Výpočet pístového detandéru	88
6.3	Turbodetandéry	90
6.4	Průběh expanze a působení ztrát v tlakovém stupni turbodetandéru	93
7.0	DĚLENÍ PLYNNÝCH SMĚSÍ PŘI KRYOGENNÍCH TEPLOTÁCH	97
7.1	Nejmenší práce na rozdělení plyné směsi	97
7.2	Destilace dvousložkové směsi	98
7.3	Nízkoteplotní rektifikace	103
7.4	Návrh rektifikační kolony	106
7.4.1	Metoda McCabe - Thielova	107
7.5	Získávání vzácných plynů	130
7.6	Příklady technologických schémat průmyslových dělicích zařízení vzduchu	111
7.7	Dělení plynů při teplotě okolí	116
7.7.1	Adsorpční procesy	116
7.7.2	Membránové procesy	118
7.8	Nízkoteplotní propírání plynů	118
8.0	NÍZKOTEPLTNÍ VÝMĚNÍKY	119
8.1	Konstrukce nízkoteplotních výměníků	119
8.2	Zvláštnosti výpočtu nízkoteplotních výměníků	121
8.3	Výpočet vícekomponentních výměníků	123
8.4	Regenerační výměníky	126
9.0	NÍZKOTEPLTNÍ IZOLACE	130
9.1	Vakuová izolace s homogenní výplní	135
9.2	Mnohovrstvá vakuová izolace (superizolace)	136
10.0	NÁDOBY NA KRYOKAPALINY	137
10.1	Konstrukce kryostatů	140
10.2	Kryovývěvy	141
10.3	Potrubní spoje	141
10.4	Potrubí se superizolací	142
11.0	KRYOGENNÍ ARMATURY	143
12.0	MĚŘENÍ TEPLOT	145
13.0	CHOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ A NĚKTERÝCH LÁTEK ZA NÍZKÝCH TEPLOT	150
14.0	SUPRAVODIVOST	154
14.1	Aplikace autonomního chladicího systému pro supravodivý magnet	158
14.2	Supravodivost umožňuje levitaci	159
14.3	Aplikace supravodivosti ve zdravotnictví	160
14.4	Termojaderná syntéza	160
15.0	APLIKACE PŘI ZACHYCOVÁNÍ TĚKAVÝCH A ZCHLAZOVÁNÍ PEVNÝCH LÁTEK	163
15.1	Zachycování těkavých organických látek	163
15.2	Kryogenní technika pro recyklaci	166
16.0	METODY DOSAHOVÁNÍ NEJNIŽŠÍCH TEPLOT	170
16.1	Metoda rozpouštění $^3\text{He}$ v $^4\text{He}$	170
16.2	Metoda adiabatické demagnetizace	171
17.0	BEZPEČNOST PRÁCE PŘI PRÁCI KRYOKAPALINAMI A PLYNY	171
17.1	Působení nízké teploty na člověka	171
17.2	Změna lokální koncentrace vzduchu	172
18.0	PŘÍLOHY	174
19.0	LITERATURA	