

OBSAH

1.	ÚVOD	11
1.1.	Přehled vývoje techniky nízkých teplot	12
2.	APLIKACE KRYOTECHNIKY	15
3.	VLASTNOSTI KRYOGENNÍCH LÁTEK	18
3.1.	Vzduch	19
3.2.	Kyslík	19
3.3.	Dusík	21
3.4.	Argon	22
3.5.	Krypton	22
3.6.	Xenon	23
3.7.	Neon	23
3.8.	Vodík	23
3.9.	Helium	25
3.9.1.	He II	26
3.9.2.	^3He	31
3.9.3.	Základní teoretické představy	32
4.	PRINCIPY CHLAZENÍ POD TEPLOTU OKOLÍ	33
4.1.	Základní možnosti ochlazování	33
4.1.1.	Využití latentního tepla fázového přechodu	33
4.1.2.	Izoentropické chlazení	33
4.1.3.	Izoentalpické chlazení	34
4.2.	Carnotův cyklus a ideální termodynamický cyklus	35
4.3.	Chladicí zařízení využívající výparného tepla kapaliny	38
4.4.	Chladicí zařízení využívající izoentropické expanze plynu konajícího vnější práci	39
4.5.	Chladicí zařízení využívající izoentalpické expanze plynu konajícího vnitřní práci (J-T ventil)	42
4.6.	Chladicí zařízení pro zkvalňování He využívající kombinace metod ochlazování	44
5.	NOVÉ TYPY KRYOGENNÍCH ZAŘÍZENÍ	46
5.1.	Vířový He refrigerátor	46
5.2.	Dielektrický refrigerátor	47
5.3.	Magnetický refrigerátor	47
5.4.	Sublimační refrigerátor	47
5.5.	Desorpční refrigerátor	48

5.6.	Zkapařňovač H ₂ s absorpčním kompresorem	49
5.7.	Termoelektrický refrigerátor (Peltierův článek)	50
5.8.	Termomagnetický refrigerátor (Ettingshausenův článek)	52
5.9.	Vířová trubice	53
5.10.	Stirlingův refrigerátor	54
5.11.	Giffordův–McMahonův refrigerátor	55
5.12.	Vuilleumierův refrigerátor	56
5.13.	Výměníky tepla, regenerátory chladicích zařízení	57
6.	METODY DOSAHOVÁNÍ TEPLOT NÍŽŠÍCH, NEŽ JE NORMÁLNÍ BOD VARU KRYOKAPALIN	59
6.1.	Ochlazování kapalin snížením tlaku par nad hladinou, zejména pro ⁴ He a ³ He	59
6.2.	Rozpouštění ³ He v ⁴ He	61
6.3.	Adiabatická krystalizace ³ He. Pomerančukův jev	64
6.4.	Adiabatická demagnetizace paramagnetických solí	66
6.5.	Jaderná adiabatická demagnetizace	68
6.6.	Závěrečné poznámky	70
6.6.1.	Kapicův odpor	70
6.6.2.	Tepelné klíče	71
6.6.3.	Porovnání chladicích účinků uvedených metod	73
7.	MĚŘENÍ NÍZKÝCH TEPLOT	74
7.1.	Pojem teploty	74
7.2.	Termodynamická absolutní stupnice	75
7.3.	Mezinárodní praktická teplotní stupnice T ₆₈	76
7.4.	Plynové teploměry	79
7.5.	Parní teploměry	83
7.6.	Elektrické odporové teploměry	85
7.6.1.	Kovové teploměry	86
7.6.2.	Uhlíkové hmotové odpory	90
7.6.3.	Termistory	97
7.6.4.	Kombinovaný uhlíkový–termistorový snímač	98
7.6.5.	Germaniové snímače	99
7.6.6.	Křemíkové snímače	102
7.6.7.	Galiumarsenidové snímače	102
7.7.	Snímače s polovodiřivým přechodem PN	103
7.7.1.	Galiumarsenidové diody	103
7.7.2.	Křemíkové diody a tranzistory	105
7.8.	Kapacitní sklokeramické snímače	106
7.9.	Termočlánky	107
7.10.	Akustická termometrie	114
7.11.	Měření velmi nízkých teplot	114
7.11.1.	Šumové teploměry	115
7.11.2.	Teploměr s pevným ³ He	116
7.11.3.	Teploměr měřící osmotický tlak na supranetěsnosti mezi zředeným roztokem ³ He v L ⁴ He a čistým L ⁴ He	116

7.11.4.	Teploměr využívající polarizačních jevů v Mössbauerově spektru	116
7.11.5.	Teploměr měřící anizotropii γ -záření polarizovaných jader	117
7.11.6.	Magnetické teploměry	117
7.11.7.	Teploměry využívající změny statické jaderné magnetické susceptibility	118
7.11.8.	Teploměry využívající nukleární magnetické rezonance (NMR)	119
7.12.	Podmínky přesného měření teploty	120
8.	MĚŘENÍ HLADIN KRYOKAPALIN	124
8.1.	Plovákové hladinoměry	125
8.2.	Optický hladinoměr	126
8.3.	Termoakustický hladinoměr	126
8.4.	Hladinoměry využívající hydrostatického tlaku sloupce kapaliny	129
8.5.	Hladinoměry využívající kondenzace par měřící látky	130
8.6.	Elektrické odporové hladinoměry	132
8.7.	Supravodivé hladinoměry	133
8.8.	Kapacitní hladinoměry	134
8.9.	Jiné typy hladinoměrů a metod určení objemu kryokapalin	135
8.10.	Automatické udržování hladiny a doplňování kryokapalin	135
9.	TEPELNÉ IZOLACE	139
9.1.	Sdílení tepla zářením	141
9.2.	Sdílení tepla konvekci	149
9.3.	Vedení tepla zbytkovým plynem	150
9.4.	Vedení tepla pevnými látkami (stěnami, závěsy)	154
9.5.	Typy prakticky užívaných tepelných izolací	157
9.5.1.	Vysokovakuová izolace	157
9.5.2.	Prášková a vakuoprášková izolace	161
9.5.3.	Mnohovrstvá izolace	163
9.5.4.	Pěnové izolační materiály	165
9.5.5.	Příklad orientačního tepelného výpočtu Dewarovy nádoby	167
9.6.	Zásobníky LN ₂ a LHe vyráběné v ČSSR a v zahraničí	169
9.7.	Kryostaty	175
9.7.1.	Lázněvé kryostaty	175
9.7.2.	Průtokové kryostaty	183
9.7.3.	Kryostat pro dlouhodobý provoz v oblasti 2 K	189
9.7.4.	Manostaty pro stabilizaci teploty v kryostatech	190
10.	VLASTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK ZA NÍZKÝCH TEPLOT	192
10.1.	Elektrická vodivost	192
10.1.1.	Izolanty	192
10.1.2.	Polovodiče	192
10.1.3.	Kovy	193
10.1.4.	Supravodiče	194
10.1.5.	Vliv magnetického pole na elektrickou vodivost (magnetorezistence)	203
10.2.	Tepelná vodivost	205
10.2.1.	Izolanty	205

10.2.2.	Kovy	207
10.3.	Měrné teplo	208
10.4.	Tepelná roztažnost	212
10.5.	Mechanické vlastnosti	214
10.5.1.	Kovy	214
10.5.2.	Nekovové materiály	217
11.	METODIKA PRÁCE S KRYOKAPALINAMI	221
11.1.	Bezpečnost při práci s kryokapalinami	221
11.1.1.	Nebezpečí asfyxie	222
11.1.2.	Popáleniny způsobené kryokapalinami	224
11.1.3.	Nebezpečí kondenzace vzduchu a vzniku vyšších tlaků	225
11.2.	Manipulace s kapalným dusíkem	228
11.3.	Zásobování kapalným dusíkem	229
11.4.	Přechovávání plynného helia	230
11.4.1.	Měření průtoku He	233
11.5.	Heliové zkapaňovače a refrigerátory a přeprava LHe	234
11.5.1.	Zásobování LHe nebo refrigerace v oblasti He teplot	234
11.5.2.	Čištění plynného He	237
11.5.3.	Doprava LHe	237
11.6.	Předchlazování lázněových He kryostatů kapalným dusíkem	238
11.7.	Přepouštění LHe ze zásobníku do kryostatu	241
11.7.1.	Metody zvýšení tlaku v zásobníku LHe	243
11.7.2.	Některé praktické zkušenosti se zaléváním a provozem He kryostatů	246
11.8.	Přelévací trubice (přepouštěče)	250
11.9.	Vybavení pracoviště začínajícího s experimenty v oboru He teplot	254
12.	NÍZKOTEPLTNÍ VAKUOVÁ TECHNIKA	257
12.1.	Odčerpávání izolačních a experimentálních prostorů	257
12.1.1.	Kryogenní metody dosahování nízkých tlaků	258
12.2.	Hledání netěsností na evakuovaných nebo tlakových soustavách	263
12.3.	Některé praktické poznámky	267
12.4.	Měření tlaku	267
12.5.	Pevnostní výpočet kryogenních zařízení	268
12.5.1.	Válcový plášť s vnitřním přetlakem	269
12.5.2.	Válcový plášť s vnějším přetlakem	270
12.5.3.	Kulový plášť	271
12.5.4.	Víka a dna	272
12.5.5.	Orientační pevnostní výpočet kryostatu	273
12.5.6.	Trubice	275
13.	SPOJOVÁNÍ MATERIÁLŮ	277
13.1.	Měkce pájené spoje	277
13.2.	Pájení natvrdo v normální atmosféře	281
13.3.	Kapilární pájení natvrdo ve vakuu	283
13.4.	Svařování elektrickým obloukem	284

13.5.	Svařování svazkem elektronů	286
13.6.	Rozebíratelné spoje	287
13.7.	Lepidla, těsnící laky a mazy pro nízkoteplotní aplikace	289

SEZNAM LITERATURY	291
-------------------	-----

DODATEK

Tab. 1.	Vlastnosti kryogenních plynů	304
Tab. 2.	Tlak nasycených par některých plynů v závislosti na teplotě (^3He , ^4He , H_2 , Ne , O_2 , N_2)	308
Tab. 3.	Teploty bodu varu (teploty nasycených par) v závislosti na tlaku	306
Tab. 4.	Viskozita plynů v závislosti na teplotě při tlaku $p = 0,1$ MPa	310
Tab. 5.	Měrná tepelná vodivost plynů při tlaku $p = 0,1$ MPa	310
Tab. 6.	Střední volná dráha L_n (cm) při $T = 293$ K a $p = 0,13$ Pa	311
Tab. 7.	Vzduch (základní fyzikální vlastnosti)	311
Tab. 8.	Kyslík (základní fyzikální vlastnosti)	312
Tab. 9.	Dusík (základní fyzikální vlastnosti)	314
Tab. 10.	Argon (základní fyzikální vlastnosti)	316
Tab. 11.	Neon (základní fyzikální vlastnosti)	318
Tab. 12.	Vodík (základní fyzikální vlastnosti)	320
Tab. 13.	Helium ^4He (základní fyzikální vlastnosti)	322
Tab. 14.	Helium ^3He (základní fyzikální vlastnosti)	326
Tab. 15.	Srovnání některých vlastností kapalného ^3He a ^4He	328
Tab. 16.	Vlastnosti některých prvků při teplotě 295 K a hodnota jejich Debyeovy teploty	329
Tab. 17.	Měrné teplo pevných látek c_p	330
Tab. 18.	Měrná tepla c_p a entalpie H pevných látek	332
Tab. 19.	Měrná tepelná vodivost $\lambda(T)$	331
Tab. 20.	Integrální měrná tepelná vodivost A_{21} v teplotním intervalu $T_2 - T_1$	334
Tab. 21.	Integrální měrná tepelná vodivost $\bar{\lambda}$ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) v teplotním intervalu $T_2 - T_1$	336
Tab. 22.	Měrná tepelná vodivost pevných látek	338
Tab. 23.	Teplotní závislost elektrického odporu Pt teploměru (podle T_{68}) a Cu teploměru	337
Tab. 24.	Termoelektrické napětí a citlivost termočlánků	340
Tab. 25.	Termoelektrické napětí a citlivost termočlánku Au + 0,03 at.% Fe chromel	341
Tab. 26.	Měrný elektrický odpor kovů	342
Tab. 27.	Měrný elektrický odpor slitin	343
Tab. 28.	Kritické parametry supravodivých prvků, slitin a sloučenin	344
Tab. 29.	Tepelná roztažnost kovových prvků	346
Tab. 30.	Tepelná roztažnost slitin	343
Tab. 31.	Tepelná roztažnost izolantů	347
Tab. 32.	Mechanické vlastnosti oceli odpovídající normě GOST	348
Tab. 33.	Neželezné kovy a slitiny (mechanické vlastnosti)	350
Tab. 34.	Mechanické vlastnosti plastů	354
Tab. 35.	Přehled definičních vztahů užitých fyzikálních veličin	356