

SPIS TREŚCI

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ _____ 8

1	WSTĘP	11
1.1	Rys historyczny rozwoju kriogeniki	16
1.2	Zastosowania kriogeniki	20
2.	WŁASNOŚCI CZYNNIKÓW KRIOGENICZNYCH	23
2.1.	Gazy uzyskiwane z powietrza, ozon i fluor	23
2.2	Metan i skroplony gaz ziemny	25
2.3	Hel	25
2.4	Wodór	28
3.	TERMODYNAMICZNE PODSTAWY UZYSKIWANIA TEMPERATUR KRIOGENICZNYCH	31
3.1.	Trzecia zasada termodynamiki i jej znaczenie w fizyce oraz technice niskich temperatur	32
3.1.1	Konsekwencje trzeciej zasady termodynamiki	34
3.2	Temperatura a energia wewnętrzna ciała, energia stanu zerowego	35
3.3.	Procesy prowadzące do obniżenia temperatury ciała	39
3.3.1	Oziębianie zewnętrzne i wewnętrzne	40
3.4.	Uogólniony proces oziębiania wewnętrznego ciała	41
3.5.	Zmiany entropii ciał w wybranych odwracalnych procesach izotermicznych	45
3.5.1	Izotermiczne sprężanie gazu doskonałego	45
3.5.2	Magnesowanie substancji paramagnetycznej	47
3.5.3	Wydłużenie taśmy gumowej	48
3.6.	Termodynamiczna ocena możliwości wykorzystania procesu do uzyskiwania niskich temperatur	48
3.7	Efektywności termodynamiczne chłodziarek kriogenicznych	51
4.	PROCESY OZIĘBIANIA WEWNĘTRZNEGO	59
4.1.	Rozprężanie izentropowe z wykonaniem pracy zewnętrznej	59
4.1.1	Rozprężarki tłokowe	61
4.1.2	Rozprężarki turbinowe	62
4.2	Dławienie izentalpowe	63
4.2.1	Zawory dławiące	69
4.3	Wypływ swobodny ze stałej objętości	69
4.4	Ekspansja gazu przy stałej energii wewnętrznej	72
4.5	Obniżenie temperatury cieczy przez odparowanie	74
4.5.1	Obniżanie ciśnienia nad parami helu	78
4.6	Adiabatyczne rozmagnesowanie paramagnetyków	79
4.6.1	Adiabatyczne rozmagnesowanie jądrowe	83
4.6.2	Substancje magnetyczne służące do uzyskiwania temperatur powyżej 1 K	85

4.7	Rozcieńczanie ^3He w ^4He , chłodziarki rozcieńczalnikowe	88
4.8	Adiabatyczne zestalanie ^3He (efekt Pomeranczuka)	93
5.	SKRAPLANIE GAZÓW KRIOGENICZNYCH	99
5.1	Idealny proces skraplania gazów. Praca minimalna	99
5.2	Dobór ilości stopni wielostopniowej skraplarki kriogenicznej oraz pośrednich poziomów temperatur	103
5.2.1	Wpływ pośrednich poziomów temperatury skraplarek wielostopniowych	103
5.3	Skraplarki z rekuperacyjnymi wymiennikami ciepła	105
5.3.1	Stopień skraplarki z zewnętrznym źródłem oziębiania	106
5.3.2	Stopień skraplarki z rozprężarką	108
5.3.3	Stopień skraplarki z zaworem dławiącym	109
5.4.	Stopnie chłodziarek z rekuperacyjnymi wymiennikami ciepła	110
5.4.1.	Stopień chłodziarki z zewnętrznym źródłem oziębiania	110
5.4.3.	Stopień chłodziarki z dławieniem	111
5.5	Obliczanie parametrów obiegu wielostopniowej skraplarki lub chłodziarki kriogenicznej	111
5.6	Chłodziarki i skraplarki Joule'a-Thomsona	112
5.6.1.	Bilans skraplarki Joule'a-Thomsona	113
5.6.2.	Bilans chłodziarki Joule'a-Thomsona	114
5.7	Skraplarki Claude'a	115
5.7	Skraplanie wodoru	116
6.	KRIOGENICZNE CHŁODZIARKI GAZOWE	119
6.1.	Chłodziarki Stirlinga	120
6.2.	Chłodziarki Gifforda – MacMahona	124
6.3.	Chłodziarki Solvaya	127
6.4.	Rury pulsacyjne	129
6.5.	Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa	132
6.6	Chłodziarki z rekuperacyjnymi wymiennikami ciepła	135
7.	ROZDZIAŁ MIESZANIN GAZOWYCH	139
7.1	Minimalna praca rozdzielu mieszaniny gazowej	139
7.2	Termodynamiczne podstawy kriogenicznego rozdzielu mieszanin gazowych	140
7.3	Kriogeniczne kolumny rektyfikacyjne	143
7.4	Rozdział powietrza na składniki	145
7.4.1.	Kriogeniczne instalacje rozdzielu powietrza	147
7.4.2.	Niekriogeniczne metody rozdzielu powietrza	154
7.5	Niskotemperaturowe procesy wydzielania helu z gazu ziemnego	156
7.6.	Wytwarzanie wodoru, rektyfikacja deuteru	157
8.	WYBRANE ZAGADNIENIA WYMIANY CIEPŁA W NISKICH TEMPERATURACH	159
8.1	Przewodzenie ciepła w niskich temperaturach	159
8.2	Konwekcja	163

8.3	Wymiana ciepła przez promieniowanie	165
8.4	Wymiana ciepła przy wrzeniu cieczy kriogenicznych	167
9.	KRIOGENICZNE ISOLACJE CIEPLNE	171
9.1	Izolacje termiczne wypełnione gazem	172
9.1.1	Pianki izolacyjne	172
9.1.2	Gazowe izolacje proszkowe	173
9.2	Izolacje próżniowe	175
9.2.1	Izolacje proszkowo - próżniowe	177
9.3	Wielowarstwowa izolacja próżniowa	178
9.4	Izolacje próżniowe z czynnymi ekranami	189
10.	WYBRANE ZAGADNIENIA KRIOSTATOWANIA NADPRZEWODNIKÓW	193
10.1	Zjawisko nadprzewodnictwa i podstawowe własności nadprzewodników	193
10.2.	Kriostatowanie wysokopolowych magnesów wykonanych z nadprzewodników niskotemperaturowych	200
10.2.1	Nasycony hel I	203
10.2.2	Hel nadkrytyczny	203
10.2.3	Nadciekły hel II	203
10.2.4	Przewodność cieplna helu II	205
10.2.5	Konwekcja wymuszona jednofazowego nadciekłego helu II	206
10.2.6	Przepływ dwufazowy nasyconego helu II	207
10.2.7	Opór cieplny Kapicy	208
10.2.8	Otrzymywanie He II w instalacjach kriostatowania nadprzewodników	208
10.3.	Kriostatowanie urządzeń wykonanych z nadprzewodników wysokotemperaturowych	210
10.3.1	Technologie cienkowarstwowe wytwarzania taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych	213
10.3.2	Technologie rurkowe wytwarzania taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych	214
10.3.3.	Optymalizacja temperatury pracy kabli nadprzewodzących	215
11.	WYBRANE KIERUNKI ROZWOJU URZĄDZEŃ I SYSTEMÓW KRIOGENICZNYCH	219
11.1	Wykorzystanie mieszanin gazów w kriogenicznych chłodziarkach Joule'a-Thomsona	220
11.2	Skraplanie gazu ziemnego	225
12.	OPTIMALIZACJA URZĄDZEŃ I SYSTEMÓW KRIOGENICZNYCH METODĄ MINIMALIZACJI GENEROWANIA ENTROPII	233
12.1	Wewnętrzne źródła entropii w systemach kriogenicznych	233
12.1.1	Ciepło rozpraszane w niskich temperaturach	234
12.1.2	Rozprężanie gazu, przepływ ze spadkiem ciśnienia	234
12.1.3	Wymiana ciepła w temperaturach kriogenicznych	234

12.1.4	Chłodzenie sprężarek _____	236
12.2	Przykład wykorzystania metody minimalizacji produkcji entropii do optymalizacji systemu izolacji cieplnej kriostatu helowego ____	237
13.	BEZPIECZEŃSTWO EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ I SYSTEMÓW KRIOGENICZNYCH _____	241
13. 1.	Zagrożenia fizjologiczne _____	241
13.1.1	Odmrożenia i hipotermia _____	241
13.1.2	Przebywanie w atmosferze zubożonej w tlen _____	243
13.1.3	Przebywanie w atmosferze wzbogaconej w tlen _____	244
13.1.4	Toksyczność kriogenów _____	246
13.2.	Wpływ kriogenów do atmosfery _____	247
13.2.1	Określenie strumieni gazu przepływającego przez zawory bezpieczeństwa _____	248
13.2.2	Awaryjny wpływ kriogenów do atmosfery _____	249
13.2.3	Zmiana zawartości tlenu w atmosferze na skutek wpływu gazów z urządzeń i instalacji kriogenicznych _____	250
13.3.	Szacowanie wagi zagrożeń wynikających z wystąpienia deficytu tlenu w pomieszczeniach z urządzeniami oraz instalacjami kriogenicznymi _____	254
13.4.	Rozprzestrzenianie się gazów kriogenicznych w atmosferze _____	257
13.4.1	Mechanizm powstawania mieszaniny helu i powietrza _____	257
14.	WPŁYW NISKICH TEMPERATUR NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH – WYBRANE ZAGADNIENIA _____	263
14.1	Plastyczność (ciągliwość) materiałów w niskich temperaturach ____	263
14.2	Kruchość wodorowa _____	268
SKOROWIDZ	_____	267