

Dariusz Butrymowicz
Piotr Baj • Kamil Śmierciew

TECHNIKA CHŁODNICZA



TECHNIKA CHŁODNICZA

Dariusz Butrymowicz
Piotr Baj • Kamil Śmierciew

TECHNIKA CHŁODNICZA

Projekt okładki i stron tytułowych
Przemysław Spiechowski

Zdjęcie na okładce
Vladyslav Danilin/Shutterstock

Wydawca
Irena Puchalska

Redaktor
Bartosz Stawiarski-Lietzau

Produkcja
Mariola Grzywacka

Łamanie
Grafini, Brwinów

Autorzy oraz Wydawnictwo Naukowe PWN dołożyli wszelkich starań, aby zawarte w tej książce informacje były rzetelne. Nie biorą oni jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych bądź autorskich. Autorzy oraz Wydawnictwo nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Wydanie publikacji zostało dofinansowane przez
Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego PAN w Gdańsku

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2014

ISBN 978-83-01-17844-4

Wydanie pierwsze

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl, www.pwn.pl
Druk i oprawa:

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	XI
Wstęp	XII

CZĘŚĆ A

1. Wprowadzenie	3
1.1. Pojęcia elementarne	3
1.2. Zasada działania parowych sprężarkowych urządzeń chłodniczych – zagadnienia elementarne	9
1.3. Pompy ciepła – zagadnienia elementarne	12
2. Podstawy termodynamiczne działania urządzeń chłodniczych	14
2.1. Odwracalność przemian	14
2.2. Zasady termodynamiki	15
2.3. Właściwości fizyczne i termodynamiczne substancji	17
2.4. Przemiany fazowe czynników	21
2.5. Przemiany termodynamiczne	30
2.5.1. Przemiana izobaryczna	31
2.5.2. Przemiana izochoryczna	35
2.5.3. Przemiana izotermiczna	40
2.5.4. Przemiana izentropowa	44
2.5.5. Przemiana izentalpowa	51
2.6. Wymiana ciepła	52
Literatura	56
3. Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła	58
3.1. Czynniki chłodnicze	58
3.1.1. Informacje ogólne	58

3.1.2. Systematyka czynników chłodniczych	60
3.1.3. Oznaczenia kodowe czynników chłodniczych	75
3.1.4. Charakterystyka wybranych czynników chłodniczych	76
3.2. Oleje chłodnicze	86
3.3. Nośniki ciepła	90
Literatura	93
4. Budowa i zasada działania urządzeń chłodniczych sprężarkowych	95
4.1. Urządzenia sprężarkowe jednostopniowe	95
4.2. Obiegi dwustopniowe	102
4.2.1. Obieg dwustopniowy z chłodzeniem pary w chłodnicy mokrej i jednostopniowym dławieniem	103
4.2.2. Obieg dwustopniowy z chłodnicą międzystopniową i dwustopniowym dławieniem	105
4.2.3. Obieg dwustopniowy z chłodzeniem cieczy w wężownicy i jednostopniowym dławieniem	107
4.2.4. Obieg z chłodzeniem cieczy w wężownicy i podwójnym dławieniem	109
4.3. Układy kaskadowe	111
4.4. Elementy wyposażenia urządzeń chłodniczych – ich funkcja, sposób działania i zasada doboru	117
4.5. Zastosowanie naturalnych czynników roboczych w układach sprężarkowych – uwagi	119
4.5.1. Dیتlenek węgla (R744)	119
4.5.2. Propan	124
4.5.3. Amoniak	129
Literatura	132
5. Efektywność energetyczna urządzeń chłodniczych	134
5.1. Chłodnicze obiegi porównawcze	134
5.2. Wpływ parametrów pracy obiegu chłodniczego Lindego na efektywność energetyczną	138
5.3. Straty dławienia	148
5.4. Niedoskonałość termodynamiczna sprężarkowych urządzeń chłodniczych i pomp ciepła	151
5.4.1. Zagadnienia podstawowe	151
5.4.2. Analiza egzergetyczna urządzenia chłodniczego	154
5.4.3. Analiza egzergetyczna pompy ciepła	161
5.4.4. Analiza egzergetyczna urządzeń chłodniczo-grzejnych	164
5.4.5. Obliczenia strat egzergetycznych sprężarkowych urządzeń chłodniczych	164
5.5. Możliwości zmniejszenia strat egzergetycznych w sprężarkowych urządzeniach chłodniczych i pompach ciepła	173
5.5.1. Ograniczenie nieodwracalności wymiany ciepła	173

5.5.2. Ograniczenie nieodwracalności procesu sprężania	174
5.5.3. Ograniczenie nieodwracalności wywołanej procesem dławienia	174
5.5.4. Ograniczenie innych nieodwracalności w obiegach chłodniczych	177
5.6. Ekologiczna ocena urządzeń chłodniczych	177
Literatura	180
6. Sprężarki	184
6.1. Podstawy teoretyczne pracy sprężarek wyporowych	184
6.2. Sprężarki tłokowe	192
6.2.1. Sprężarki hermetyczne	192
6.2.2. Sprężarki półhermetyczne	193
6.2.3. Sprężarki tłokowe dławnicowe	194
6.3. Sprężarki spiralne	195
6.4. Sprężarki śrubowe	197
6.5. Dobór sprężarki	199
Literatura	207
7. Wymienniki ciepła	208
7.1. Parowniki	208
7.1.1. Uwagi ogólne	208
7.1.2. Parowniki suche	210
7.1.3. Parowniki zalane	214
7.1.4. Parowniki mokre	214
7.2. Skraplacze	217
7.3. Intensyfikacja wymiany ciepła	225
7.4. Wymiana ciepła w pośrednich systemach chłodzenia	228
Literatura	232
8. Przyrządy regulacyjne i zabezpieczające instalacji chłodniczych	234
8.1. Urządzenia obniżające ciśnienie w instalacjach chłodniczych	234
8.1.1. Termostatyczne zawory regulacyjne (rozprężne)	234
8.1.2. Elektroniczne zawory regulacyjne	238
8.1.3. Rurki kapilarne	240
8.2. Urządzenia zabezpieczające	241
8.3. Odszranianie parowników	246
Literatura	249
9. Aparatura pomocnicza urządzeń chłodniczych	250
9.1. Układ regulacji poziomu oleju w sprężarkach	250
9.2. Separatory oleju	252
9.3. Oddzielacze cieczy	254
9.4. Zbiorniki cieczy	255

9.5. Odwadniacze (filtry chemiczne)	256
9.6. Filtry mechaniczne	258
9.7. Dochładzacze	258
9.8. Wzierniki	258
9.9. Zawory bezpieczeństwa	259
9.10. Zawory elektromagnetyczne	260
9.11. Zawory kulowe odcinające	260
9.12. Wymiarowanie przewodów rurowych	261
Literatura	264
10. Agregaty chłodnicze	265
10.1. Agregaty skraplające	265
10.2. Sprężarkowe schładzacze cieczy	269
10.3. Agregaty sprężarkowe	276
Literatura	279
11. Absorpcyjne urządzenia chłodnicze	280
11.1. Uwagi ogólne	280
11.2. Amoniakalno-wodne urządzenia absorpcyjne	281
11.2.1. Zasada działania i obieg	281
11.2.2. Obliczenia obiegu amoniakalno-wodnego	290
11.2.3. Obliczenia obiegu z wymiennikami regeneracyjnymi	298
11.3. Urządzenia absorpcyjne bromolitowe	303
Literatura	307
12. Chłodnicze urządzenia strumienicowe	308
12.1. Informacje ogólne	308
12.2. Podział strumienic	308
12.3. Budowa i zasada działania chłodniczych układów strumienicowych	310
12.4. Aspekty fizyczne działania strumienicy parowej jednofazowej	315
12.5. Efektywność energetyczna urządzeń strumienicowych	317
Literatura	322

CZĘŚĆ B

13. Przygotowanie do uzyskania certyfikatu	327
13.1. Wstęp	327
13.2. Zakres wiedzy i umiejętności określony w Rozporządzeniu Komisji (WE) Nr 303/2008 z 2 kwietnia 2008 r.	337
13.3. Wybrane Polskie Normy	402
Literatura	404

14. Informacje uzupełniające	406
14.1. Najnowsze regulacje prawne w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych	406
14.2. Wybrane zagadnienia w zakresie etykietowania urządzeń	410

CZĘŚĆ C

15. Właściwości termodynamiczne i termokinetyczne czynników roboczych	415
15.1. Modelowanie wybranych właściwości termodynamicznych i termokinetycznych czynników chłodniczych	415
15.2. Nośniki ciepła stosowane w technice chłodniczej	432
15.2.1. Ergolidy	432
15.2.2. Pekasol	434
15.2.3. Antifrogen	434
15.2.4. Tyfocor	435
15.2.5. Tyfoxit	435
15.3. Tabele właściwości termodynamicznych i termokinetycznych wybranych czynników chłodniczych	436
Literatura	545

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	– współczynnik wyrównania temperatury, m^2/s
A	– pole powierzchni, m^2
b	– egzergia właściwa, J/kg
B	– egzergia, J
c	– ciepło właściwe, $J/(kg \cdot K)$
D	– średnica, m
COP	– współczynnik efektywności energetycznej
E	– energia, J
f	– krotność cyrkulacji
g	– przyspieszenie ziemskie, m/s^2
h	– entalpia właściwa, $J/(kg \cdot K)$; różnica wysokości, m
I	– natężenie prądu, A
k	– współczynnik przenikania ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$
l	– praca jednoskowa, J/kg ; długość, m
L	– praca zewnętrzna, J
m	– masa, kg
M	– masa molowa, $kg/kmol$
\dot{m}	– masowe natężenie przepływu, kg/s
P	– moc, W
q	– jednostkowa wydajność chłodnicza, J/kg
Q	– wydajność chłodnicza, J
\dot{Q}	– strumień ciepła, W
R	– indywidualna stała gazowa, $J/(kg \cdot K)$; rezystancja, Ω
s	– entropia właściwa, $J/(kg \cdot K)$
t	– temperatura, $^{\circ}C$
T	– temperatura, K
U	– masowy stosunek zasysania, napięcie elektryczne, V ; energia wewnętrzna, J

-
- v – objętość właściwa, m^3/kg
 V – objętość, m^3
 w – prędkość, m/s
 x – stopień suchości

oznaczenia greckie

- α – współczynnik wnikania ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$
 Δ – różnica
 ζ – współczynnik oporu miejscowego
 ξ – stężenie
 η – sprawność
 κ – wykładnik izentropy
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $W/(m \cdot K)$
 μ – lepkość dynamiczna, $Pa \cdot s$
 ν – lepkość kinematyczna, m^2/s
 Π – spręż
 ρ – gęstość, kg/m^3
 σ – napięcie powierzchniowe, N/m
 χ – objętościowy stosunek zasysania

indeksy

- a – absorber
 b – egzergia właściwa, egzergetyczny; roztwór bogaty
 c – strumień napędowy; płyn zimny
 C – obieg Carnota
 d – dochłodzenie
 e – strumienica
 fg – przemiana parowania lub skraplania
 g – generator
 h – płyn gorący
 k – skraplanie
 l – ciecz
 m – międzystopniowy; komora mieszania; wartość średnia
 n – strumień napędowy
 o – parowanie
 ot – otoczenie
 p – pompa, przegrzanie
 spr – sprężanie
 t – teoretyczna
 $tł$ – tłoczenie

Wykaz ważniejszych oznaczeń

u	– roztwór ubogi
w	– warnik
wl	– wlot
wyl	– wylot
v	– para
,	– ciecz nasycona
„	– para nasycona

Wstęp

Niniejszy poradnik obejmuje podstawowe zagadnienia techniki chłodniczej, istotne ze względu na certyfikację zgodną z aktualnym stanem prawnym w tej dziedzinie techniki w Europie. W książce zawarto jednak również wiele zagadnień uzupełniających, przedstawiających nowe rozwiązania wynikające w dużej mierze z aktualnych wymagań w zakresie ochrony środowiska oraz efektywności energetycznej.

Układy chłodnicze oraz pompy ciepła znajdują powszechne zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, takich jak: technologia chłodnicza żywności, przemysł chemiczny, medycyna, a także w życiu codziennym: domowe oraz handlowe urządzenia chłodnicze i zamrażalnice, klimatyzacja pomieszczeń, klimatyzacja samochodowa, nowoczesne systemy ogrzewania za pomocą pomp ciepła.

Jest rzeczą oczywistą, że należy poszukiwać metod podwyższenia efektywności energetycznej wszelkich urządzeń, w tym także urządzeń chłodniczych i pomp ciepła. Wynika to bowiem z powszechnego dążenia do obniżenia energochłonności procesów technologicznych, maszyn i urządzeń, którego ostatecznym celem jest zminimalizowanie skutków działalności technicznej człowieka na środowisko naturalne. Ważne jest przede wszystkim ograniczenie wykorzystywania kurczących się zasobów paliw kopalnych do wytwarzania energii napędowej. W przypadku urządzeń chłodniczych i pomp ciepła pilna potrzeba skutecznej poprawy ich efektywności energetycznej wynika jednak z dodatkowych przesłanek, specyficznych dla tej grupy urządzeń, które w najbliższych latach będą miały decydujące znaczenie.

Sprawą najważniejszą na obecnym etapie rozwoju techniki chłodniczej, klimatyzacyjnej i pomp ciepła jest konieczność wycofania z użycia powszechnie stosowanych dotąd syntetycznych płynów roboczych. Fakt ten ma tak kluczowe znaczenie dlatego, że wszelkie rozwiązania w tej

dziedzinie techniki są uwarunkowane przede wszystkim właściwościami termodynamicznymi czynników roboczych. Wraz ze zmianą czynnika roboczego w większości przypadków modyfikacji muszą ulec rozwiązania techniczne omawianej grupy urządzeń, a niekiedy konieczna jest zdecydowana zmiana konstrukcji urządzeń. Działania te powodują, że zdecydowanemu pogorszeniu ulega zazwyczaj osiągnięta efektywność energetyczna tych urządzeń.

Jako pierwsze wycofano z techniki chłodniczej powszechnie stosowane czynniki syntetyczne należące do grupy CFC. Płyny te uznano bowiem za główną przyczynę destrukcji warstwy ozonowej w stratosferze ziemskiej. W dalszej kolejności zdecydowano o wycofaniu ze stosowania w nowych instalacjach czynników syntetycznych należących do grupy HCFC, również kierując się względami ochrony warstwy ozonowej. Należy jednak podkreślić, iż dla zdecydowanej większości tych właśnie czynników uzyskiwano najwyższą efektywność energetyczną urządzeń chłodniczych oraz pomp ciepła. Obecnie uznaje się, że aplikacyjne znaczenie mają czynniki syntetyczne bezchlorowe (należące do grup: HFC, FC) oraz czynniki naturalne (amoniak, węglowodory, ditlenek węgla, w niektórych zastosowaniach także woda i powietrze), a również wszelkie rozwiązania techniczne umożliwiające pracę bez czynnika roboczego (urządzenia termoelektryczne, układy chłodzenia magnetycznego i inne).

Kolejnym efektem oddziaływania urządzeń chłodniczych i pomp ciepła na środowisko naturalne jest, wedle powszechnie już uznawanych ocen, znaczny ich udział w tworzeniu efektu cieplarnianego, którego końcowym objawem może być globalna zmiana klimatu. Podstawowym gazem tworzącym ten efekt jest ditlenek węgla w ilości przekraczającej naturalne zasoby ziemskiej atmosfery. Okazuje się, że większość syntetycznych czynników stosowanych w technice chłodniczej i pomp ciepła to związki, które po wydostaniu się do atmosfery biorą udział w mechanizmie efektu cieplarnianego w znacznie większym stopniu niż ditlenek węgla. W związku z tym, że w zdecydowanej większości są one fluorowanymi pochodnymi węglowodorów, w żargonie określa się je jako tzw. F-gazy.

Przykładowo, czynnik R134a, który jest jednym z najpowszechniej obecnie stosowanych czynników roboczych, tworzy ten efekt około 1430 razy intensywniej niż ditlenek węgla. Dąży się zatem do eliminowania stosowania wszystkich płynów roboczych o wysokim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego. Należą jednak do tej rodziny niemal wszystkie czynniki syntetyczne, rozważane w ostatnich latach również jako płyny proekologiczne.