

Wiesław Pudlik

TERMODYNAMIKA

Gdańsk 2020

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR

Zdzisław Puhaczewski

RECENZENT

Wiesław Jasiński

PRZYGOTOWANIE DO DRUKU I PROJEKT OKŁADKI

Ireneusz Jelonek

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2020

ISBN 978-83-7348-798-7

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie III. Ark. wyd. 20,7, ark. druku 26,0, 1218/1089

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

SPIS TREŚCI

	Str.
PRZEDMOWA DO PIERWSZEGO WYDANIA	5
PRZEDMOWA DO OBECNEGO WYDANIA	6
1. PODSTAWOWE POJĘCIA	7
1.1. Przedmiot i podział termodynamiki	7
1.2. Energia	8
1.3. Substancja	11
1.4. System termodynamiczny	13
1.5. Stan termodynamiczny	14
1.6. Przemiana	19
1.7. Praca	21
1.8. Ciepło	27
1.9. Energia a ciepło i praca	34
2. PIERWSZA ZASADA TERMODYNAMIKI	37
2.1. System zamknięty	38
2.2. System otwarty (przepływowy)	40
3. WŁAŚCIWOŚCI GAZÓW	45
3.1. Modele gazów	45
3.2. Równanie stanu	46
3.3. Prawo Avogadra	55
3.4. Energia cieplna i entalpia	58
3.5. Związek między ciepłami właściwymi	65
3.6. Ciepła molowe gazów doskonałych według teorii kinetycznej	69
3.7. Ciepła molowe gazów półdoskonałych	71
3.8. Mieszanki gazów doskonałych lub półdoskonałych	74
4. PRZEMIANY GAZÓW	83
4.1. Przemiany charakterystyczne	83
4.2. Ogólna przemiana ogólna gazów doskonałych – Politropa	84
4.3. Praca w charakterystycznych przemianach gazów doskonałych	94
4.4. Obiegi termodynamiczne	101
4.5. Dławienie adiabatyczne	118
4.6. Adiabatyczne napełnianie i opróżnianie zbiorników	121
5. DRUGA ZASADA TERMODYNAMIKI I JEJ KONSEKWENCJE	130
5.1. Sformułowania werbalne	130
5.2. Odwracalność i nieodwracalność procesów	131
5.3. Praca w procesach odwracalnych i nieodwracalnych	133
5.4. Sprawności obiegów odwracalnych i nieodwracalnych	138
5.5. Entropia i wykres T-s	141
5.6. Zastosowania fizyczne entropii	163
5.7. Ogólne wyrażenie analityczne II zasady termodynamiki	167
5.8. Termodynamiczna skala temperatury	168
5.9. Warunki stabilności systemów termodynamicznych	173
5.10. Równania termodynamiczne Maxwella	180
5.11. Molekularno-statystyczny sens entropii	183

	Str.
6. EGZERGIA	188
6.1. Egzergia substancji i ciepła	188
6.2. Prawo Gouy–Stodoli	192
6.3. Bilans egzergii	194
6.4. Sprawność egzergetyczna	195
7. WŁAŚCIWOŚCI JEDNOSKŁADNIKOWYCH PAR NASYCONYCH	200
7.1. Proces izobarycznego parowania	200
7.2. Energia cieplna i entalpia w procesie parowania	205
7.3. Równanie Clausiusa–Clapeyrona	214
7.4. Stan i funkcje stanu pary mokrej	215
7.5. Przemiany charakterystyczne pary mokrej	220
8. WŁAŚCIWOŚCI PAR PRZEGRZANYCH	228
8.1. Równanie stanu	229
8.2. Energia cieplna, entalpia i ciepła właściwe	238
8.3. Użytkowe wykresy entalpowe	240
9. TERMODYNAMICZNE OBIEGI PAROWE	244
9.1. Prawobieżne obiegi Clausiusa–Rankine’a	245
9.2. Obieg rzeczywistej siłowni parowej	260
9.3. Lewobieżny obieg Lindego	265
9.4. Obieg rzeczywistej pompy ciepła	274
10. ZJAWISKO JOULE’A–THOMSONA	277
10.1. Miary ilościowe zjawiska	277
10.2. Praca przemiany izotermicznej gazów niedoskonałych	285
10.3. Skraplanie gazów	286
11. GAZY WILGOTNE	294
11.1. Podstawowe pojęcia	294
11.2. Równanie stanu	299
11.3. Entalpia i energia cieplna	301
11.4. Wykres entalpia – zawartość wilgoci	304
11.5. Przemiany sprężania i rozprężania	308
11.6. Przemiany izobaryczne	311
11.7. Zmiany temperatury wody zawartej w powietrzu przesyconym wynikające ze zmieszania z powietrzem nienasyconym	325
12. TERMODYNAMIKA SPALANIA	332
12.1. Ogólne wiadomości o spalaniu	332
12.2. Bilans ilości substancji przy spalaniu paliw stałych i ciekłych	334
12.3. Bilans ilości substancji przy spalaniu paliw gazowych	345
12.4. Stechiometryczna kontrola spalania	349
12.5. Efekty energetyczne spalania	355
12.6. Bilans energii urządzeń spalających	366
12.7. Energetyczna kontrola spalania	369
12.8. Temperatura spalania	373
13. TERMODYNAMIKA PRZEPIYWÓW	378
13.1. Podstawowe równania i pojęcia	378
13.2. Adiabatyyczny przepływ przez dysze	385
13.3. Analiza przepływu izentropowego w kanale o zmiennym przekroju	403
13.4. Dysze w przypadku zmiany przeciwności	407
13.5. Adiabatyyczny przepływ przez kanał o stałym przekroju	410
BIBLIOGRAFIA	414

PRZEDMOWA DO PIERWSZEGO WYDANIA

*Cogito, ergo sum**)

René Descartes (Kartezjusz)

Termodynamika uchodzi, nie bez racji, za jeden z trudniejszych przedmiotów w toku studiów, przygotowujących do zawodu inżyniera–mechanika. Dzieje się tak zapewne dlatego, że relacje termodynamiczne mają charakter bardzo ogólny i stosują się do dowolnych ciał fizycznych niezależnie od rodzaju czy struktury tych ciał. Stąd uniwersytecki podręcznik K. Gumińskiego o objętości 353 stron zawiera tylko jeden schemat unaoczniający rzeczywistość substancjalną oraz kilka wykresów zależności matematycznych. Jednakże inżynier–mechanik ma zawsze do czynienia z obiektami konkretnymi, w których przebiegają interesujące go procesy fizyczne. Dlatego wykład termodynamiki **technicznej** musi wiązać abstrakcyjne pojęcia i zależności termodynamiczne z właściwościami substancji z jednej, a rozlicznymi zastosowaniami technicznymi z drugiej strony.

Tak jest również w niniejszym skrypcie, w którym ogólne koncepcje i prawa termodynamiki wyłożone są z myślą o ich zastosowaniach praktycznych.

Jednakże dopiero po rozwiązaniu szeregu zadań poznaje Studiujący właściwą użyteczność tego przedmiotu. Poza tym cykl nauczania termodynamiki obejmuje jeszcze dwie serie ćwiczeń laboratoryjnych: pierwszą uczącą umiejętności wykonywania pomiarów głównych wielkości termodynamicznych oraz drugą umożliwiającą samodzielne przeprowadzanie i opracowywanie energetycznych pomiarów typowych maszyn i urządzeń.

W skrypcie niniejszym wykorzystano wieloletnie doświadczenie w nauczaniu termodynamiki, jakie autor uzyskał w kontakcie ze studentami Wydziałów Mechanicznych oraz Oceanotechniki i Okrętownictwa PG, i żywi on przekonanie, że z treści skryptu odniosą pożytek następne roczniki studiujących na tych Wydziałach.

Gdańsk, kwiecień 1993 r.

*¹) Myślę więc jestem (łac.)

PRZEDMOWA DO OBECNEGO WYDANIA

Obecne wydanie jest piątym z kolei, a trzecim papierowym po edycjach z lat 1993 i 1998 oraz po dwóch wydaniach cyfrowych zamieszczonych w latach 2007 i 2010 najpierw w Wirtualnej Bibliotece Sieci Semantycznej Politechniki Gdańskiej, a następnie w Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej, która przejęła zasoby tej pierwszej. Kolejne wydanie papierowe okazało się konieczne wobec licznych zapytań o książkę w księgarni PG, jak i ze względu na dużą liczbę osób zainteresowanych wydaniem cyfrowym w PBC.

Przygotowując kolejne wydania, dokonywano krytycznego przeglądu treści wydań poprzednich, skutkiem czego były zmiany polegające na usuwaniu niedostrzeżonych wcześniej błędów edytorskich. Wnoszono jednak również większe zmiany, eliminując treści o charakterze dygresyjnym, a także poszerzając niektóre fragmenty, tak by ułatwić percepcję przekazywanego materiału.

Obecne wydanie opiera się na treści wydrukowanej w 1998 roku, do której wprowadzono wszystkie zmiany wniesione do obydwu wydań cyfrowych z lat 2007 i 2010.

Gdańsk, marzec 2020