

TERMODYNAMIKA

ZADANIA I PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

**JANUSZ T. CIEŚLIŃSKI
DARIUSZ GRUZIŃSKI
WIESŁAW JASIŃSKI
WIESŁAW PUDLIK**

pod redakcją

WIESŁAWA PUDLIKA

GDAŃSK 2017

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Janusz T. Cieśliński

RECENZENT
Władysław Nowak

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI
Katarzyna Olszonowicz

Wydanie I – 2000

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

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

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017

ISBN 978-83-7348-705-5

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie II. Ark. wyd. 10,3, ark. druku 11,5, 1161/984

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

SPIS TREŚCI

Przedmowa	5
1. Ciśnienie (<i>Wiesław Pudlik</i>)	7
2. Proste przekształcenia energii (<i>Wiesław Pudlik</i>)	11
3. Ciepło (<i>Wiesław Pudlik</i>)	13
4. Praca (<i>Wiesław Pudlik</i>)	17
5. Pierwsza zasada termodynamiki (<i>Wiesław Pudlik</i>)	20
6. Stany i funkcje stanu gazów doskonałych i półdoskonałych (<i>Dariusz Grudziński</i>) ...	24
7. Roztwory gazowe (<i>Dariusz Grudziński</i>)	29
8. Charakterystyczne przemiany gazów doskonałych (<i>Dariusz Grudziński,</i> <i>Wiesław Pudlik</i>)	38
9. Obiegi termodynamiczne gazów (<i>Janusz Cieśliński, Wiesław Pudlik</i>)	52
10. Egzergia (<i>Wiesław Pudlik</i>)	65
11. Stany i funkcje stanu par nasyconych i przegrzanych (<i>Wiesław Jasiński,</i> <i>Wiesław Pudlik</i>)	68
12. Charakterystyczne przemiany par nasyconych i przegrzanych (<i>Wiesław Jasiński,</i> <i>Wiesław Pudlik</i>)	76
13. Termodynamiczne obiegi parowe (<i>Wiesław Pudlik</i>)	89
14. Efekt Joule’a–Thomsona – skraplanie powietrza (<i>Wiesław Pudlik</i>)	99
15. Stany i przemiany gazów wilgotnych (<i>Wiesław Jasiński</i>)	104
16. Stechiometria i termodynamika spalania (<i>Wiesław Pudlik</i>)	126
17. Termodynamika przepływów (<i>Wiesław Pudlik</i>)	136
18. Przenoszenie ciepła (<i>Wiesław Pudlik</i>)	145
Tablice termodynamicznych właściwości gazów i par	160
1. Właściwości wybranych gazów	160
2. Średnie ciepła właściwe gazów przy stałym ciśnieniu $c_p _0^t$ [kJ/kg·K]	160
3. Średnie ciepła molowe gazów przy stałym ciśnieniu $\tilde{c}_p _0^t$ [kJ/kmol·K]	161
4. Wyciąg z tablic pary nasyconej H ₂ O uszeregowany wg temperatur	163
5. Wyciąg z tablic pary nasyconej H ₂ O uszeregowany wg ciśnień	166
6. Wyciąg z tablic pary przegrzanej H ₂ O	168
7. Właściwości pary nasyconej amoniaku NH ₃	183
8. Właściwości pary nasyconej H ₂ O w równowadze z lodem lub wodą	184

Wykresy termodynamiczne (załączniki – wkładka)

Wykres $h-s$ dla pary wodnej

Wykres $P-h$ dla amoniaku

Wykres $T-s$ dla powietrza

Wykres $h-X$ dla powietrza wilgotnego

PRZEDMOWA

Słyszałem – zapomniałem

Widziałem – pamiętam

Zrobiłem – rozumiem

Stara mądrość chińska

Stosownie do zacytowanej, jako motto, starochińskiej mądrości, przerobienie odpowiedniej liczby zadań przez studiującego pozwala mu nie tylko ogarnąć myślowo obszar praktycznych zastosowań Termodynamiki, ale również zrozumieć ten przedmiot.

W niniejszym zbiorze pomieszczono zarówno przykłady, jak i zadania. Przykłady zawierają pełny tok rozwiązań i są reprezentatywne dla pewnych typów zadań. Pomaga to rozwiązywać pozostałe zadania, w których podano jedynie ostateczne wyniki obliczeń.

We wszystkich obliczeniach stosuje się jako jednostkę ciśnienia kilopaskale ($\text{kPa} = \text{kN/m}^2$), co znakomicie ułatwia te obliczenia, np. w przypadku pracy – dając od razu kilodżule (kJ) albo mocy – otrzymywanej w kilowatach (kW). Dalszymi przykładami są obliczenia wykonywane za pomocą termicznego równania stanu z ciśnieniem w kPa i stałą gazową R_i w kiloniutonometrach ($\text{kNm} = \text{kJ}$) oraz związku tej stałej z ciepłami właściwymi c_p i c_v . Dzięki konsekwentnemu stosowaniu jednostek będących tysiącokrotnościami jednostek podstawowych, kg, kN, kNm, kPa, kJ i kW, ujawnia się w pełni prostota wzorów wielkościowych. Oczywiście metr, sekunda i kelwin pozostają w postaci podstawowej.

Aby dobrze opanować przedmiot, trzeba rozwiązać dużą liczbę zadań. Jeżeli nie można rozwiązać wszystkich, a w kilku rozdziałach, zwłaszcza początkowych, jest to w zupełności możliwe, a nawet konieczne, wówczas można opuścić te zadania, przy czytaniu których już widzi się oczami wyobraźni sposób rozwiązania.

Do rozwiązania zadań niezbędna jest znajomość termodynamicznych właściwości gazów i par. Podane są one na końcu podręcznika w postaci tablic liczbowych i wykresów.

Treść oparto na wieloletnim doświadczeniu autorów. Większa część rozdziałów służyła już za pomoc dydaktyczną w latach 1997–1999, na zasadzie powielania rękopisu. Zebrane w tym czasie uwagi przyczyniły się do udoskonalenia ostatecznej wersji, która teraz ukazuje się drukiem.

Gdańsk, sierpień 2017

Wiesław Pudlik