AGNIESZKA SADŁOWSKA-SAŁĘGA
JAN RADOŃ

PODSTAWY TERMODYNAMIKI

WNiT
Wydawnictwo Nauka i Technika

Dr inż. Agnieszka Sadłowska-Sałęga. Absolwentka Politechniki Krakowskiej, Wydział Inżynierii Środowiska.

Dr hab. inż. Jan Radoń, prof. Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Absolwent Politechniki Krakowskiej, Wydział Inżynierii Lądowej.

Autorzy są pracownikami naukowo-dydaktycznymi Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji. Prowadzą zajęcia z przedmiotów: termodynamika techniczna; ogrzewnictwo, wentylacja i klimatyzacja; alternatywne źródła energii; certyfikacja energetyczna budynków.

Projekt okładki
Andrzej Leśkiewicz

Redakcja
Krzysztof Janus

W książce omówiono w sposób przystępny, zwięzły i logiczny zasady termodynamiki - ogólne prawa obowiązujące we wszelkich typach układów i wszelkich przemianach fizycznych i chemicznych. Przedstawiono podstawowe zasady termodynamiki, przemiany charakterystyczne gazów doskonałych i półdoskonałych, zasady przepływu ciepła i termodynamikę przepływów, obiegi porównawcze silników cieplnych i urządzeń chłodniczych. Zaletą książki jest poparcie teorii odpowiednimi przykładami rachunkowymi, w których uwzględniono najczęściej spotykane w praktyce inżynierskiej procesy i urządzenia.
Książka jest przeznaczona dla studentów wyższych uczelni technicznych oraz dla specjalistów zajmujących się techniką cieplną.

Do książki dołączono:
Wykres „*i-s*" entalpia-entropia dla pary wodnej do 1000°C i 95 MPa
Opracowany na podstawie „Termodynamiczne właściwości wody i pary wodnej"
wg. M.P. Wukałowicza.
Wykres „*i=x*" Molliera dla powietrza wilgotnego

Copyright © by Wydawnictwo Nauka i Technika Warszawa 2015

ISBN 978-83-64014-07-9

All rights reserved.
Żadna część tej pracy nie może być powielana i rozpowszechniana w jakiejkolwiek formie i jakikolwiek sposób (elektroniczny lub mechaniczny) bez pisemnej zgody wydawcy.

Wydawnictwo Nauka i Technika
ul. Uniwersytecka 5
02-036 Warszawa
Tel./fax 22 234 43 74; kom. 602 476 653
www.wnit.pl; biuro@wnit.pl

Przygotowanie do druku:
ANTER www.anter.waw.pl

Druk i oprawa:
P.W.P. INTERDRUK
Annopol 4, 03-236 Warszawa
tel. 22 814 60 80

Spis treści

1. Podstawowe pojęcia 9
   1.1. Materia, substancja 9
   1.2. Układ termodynamiczny 9
   1.3. Stan termodynamiczny. Zerowa zasada termodynamiki 11
   1.4. Przemiana termodynamiczna 11
   1.5. Temperatura 12
      1.5.1. Pomiar temperatury 12
      1.5.2. Skale temperatury 12
   1.6. Ciśnienie 15
      1.6.1. Pomiar ciśnienia 16
      1.6.2. Jednostki ciśnienia 16
   1.7. Przykłady 17

2. Gaz jako czynnik termodynamiczny 19
   2.1. Prawa gazowe 20
      2.1.1. Prawo Avogadra 20
      2.1.2. Prawo Boyle'a-Mariotte'a 20
      2.1.3. Prawo Gay-Lussaca 21
      2.1.4. Prawo Charlesa 23
   2.2. Równanie stanu gazu doskonałego i półdoskonałego 24
      2.2.1. Ciepło właściwe 24
      2.2.2. Stała gazowa 25
      2.2.3. Równanie Clapeyrona – równanie stanu gazu doskonałego 27

3. Bilans energii. Pierwsza zasada termodynamiki 34
   3.1. Energia wewnętrzna układu 34
   3.2. Praca i ciepło przemiany 36
      3.2.1. Praca przemiany 36
         3.2.1.1. Praca bezwzględna 37
         3.2.1.2. Praca użyteczna 38

3.2.1.3. Praca techniczna 39
3.2.2. Ciepło przemiany 42
3.3. Entalpia i entropia. 43
3.3.1. Entalpia. 43
3.3.2. Entropia 43
3.4. Pierwsza zasada termodynamiki. 45
3.4.1. Bilans energii przemiany termodynamicznej 45
3.4.2. Bilans energii przemiany termodynamicznej maszyny przepływowej 46

4. Przemiany charakterystyczne gazów doskonałych 48
4.1. Przemiany charakterystyczne 48
4.1.1. Przemiana izobaryczna. 48
4.1.2. Przemiana izochoryczna. 51
4.1.3. Przemiana izotermiczna 53
4.1.4. Przemiana izentropowa (adiabata) 55
4.1.5. Przemiana politropowa. 58
4.2. Napełnianie i opróżnianie zbiornika. 60
4.2.1. Napełnianie zbiornika. 60
4.2.2. Opróżnianie zbiornika 62
4.3. Przykłady 63

5. Obiegi termodynamiczne. Druga zasada termodynamiki 73
5.1. Obiegi termodynamiczne 73
5.1.1. Obiegi prawo- i lewobieżne 74
5.1.1.1. Obieg prawobieżny 74
5.1.1.2. Obieg lewobieżny 74
5.1.2. Praca obiegu i ciepło obiegu 75
5.1.2.1. Obieg prawobieżny 75
5.1.2.2. Obieg lewobieżny 77
5.1.3. Sprawność i efektywność obiegu 78
5.1.3.1. Obieg prawobieżny 78
5.1.3.2. Obieg lewobieżny 78
5.1.4. Typowe porównawcze obiegi gazowe 79
5.1.4.1. Obieg Carnota 80
5.1.4.2. Obiegi silników spalinowych tłokowych 82
5.1.4.3. Obiegi silników spalinowych, turbinowych 86
5.1.4.4. Gazowe obiegi chłodnicze. 88
5.1.4.5. Sprężanie 89
5.2. Druga zasada termodynamiki 94
5.3. Przykłady 95

6. Właściwości jednoskładnikowych par nasyconych . . . 101
6.1. Przemiany fazowe . . . 101
6.2. Energia cieplna i entalpia w procesie parowania . . . 104
6.3. Przemiany charakterystyczne pary . . . 112
6.3.1. Przemiana izotermiczna . . . 112
6.3.2. Przemiana izochoryczna . . . 113
6.3.3. Przemiana izobaryczna . . . 115
6.3.4. Przemiana adiabatyczna odwracalna (izentropa odwracalna) . . . 117
6.3.5. Przemiana izentalpowa . . . 118
6.4. Parowe obiegi porównawcze . . . 119
6.4.1. Obieg Clausiusa-Rankine'a . . . 119
6.4.2. Obieg Lindego . . . 123
6.5. Przykłady . . . 125

7. Powietrze wilgotne . . . 135
7.1. Podstawowe parametry powietrza wilgotnego . . . 136
7.1.1. Zawartość wilgoci . . . 136
7.1.2. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej . . . 136
7.1.3. Ciśnienie pary wodnej w stanie nasycenia . . . 138
7.1.4. Wilgotność powietrza . . . 139
7.1.4.1. Wilgotność bezwzględna powietrza . . . 139
7.1.4.2. Wilgotność właściwa powietrza . . . 140
7.1.4.3. Wilgotność względna powietrza . . . 140
7.1.5. Stopień nasycenia . . . 141
7.1.6. Temperatura . . . 141
7.1.6.1. Temperatura wg termometru mokrego i temperatura adiabatycznego nasycenia . . . 141
7.1.7. Temperatura punktu rosy . . . 143
7.1.8. Entalpia powietrza wilgotnego . . . 143
7.2. Wykres „*i*-*x*" Molliera . . . 148
7.2.1. Konstrukcja wykresu „*i*-*x*" Molliera . . . 149
7.2.2. Parametry powietrza wilgotnego na wykresie „*i*-*x*" Molliera . . . 155
7.2.3. Przemiany powietrza wilgotnego . . . 159
7.2.3.1. Mieszanie powietrza . . . 159
7.2.3.2. Ogrzewanie powietrza w nagrzewnicy . . . 162
7.2.3.3. Chłodzenie powietrza w chłodnicach powierzchniowych . . . 163
7.2.3.4. Procesy zachodzące w komorze zraszania . . . 165
7.2.3.5. Nawilżanie parowe powietrza . . . 169
7.3. Przykłady . . . 171

8. Wymiana ciepła 185
8.1. Podstawowe pojęcia 185
8.2. Podstawowe sposoby przenoszenia ciepła 186
8.2.1. Konwekcja 187
8.2.2. Przewodzenie 189
8.2.3. Promieniowanie 191
8.3. Przenoszenie ciepła przez przegrody płaskie 195
8.3.1. Wnikanie ciepła 195
8.3.2. Przewodzenie ciepła 196
8.3.3. Przenikanie ciepła 198
8.4. Przenoszenie ciepła przez przegrody walcowe 201
8.4.1. Wnikanie ciepła 201
8.4.2. Przewodzenie ciepła 202
8.4.3. Przenikanie ciepła 204
8.5. Izolowanie przegród 206
8.5.1. Izolowanie przegród płaskich 206
8.5.2. Izolowanie przegród walcowych 206
8.6. Przykłady 208

Skorowidz 215
Bibliografia 219

1. Podstawowe pojęcia

1.1. Materia, substancja

Materią potocznie nazywamy ogół istniejących przedmiotów fizycznych, które możemy poznawać zmysłami. W sensie fizycznym wszystko co ma masę nazywamy materią.

Materia składająca się z atomów, drobin oraz innych cząstek elementarnych (materia o budowie korpuskularnej) mająca masę spoczynkową różną od zera nazywana jest *substancją*.

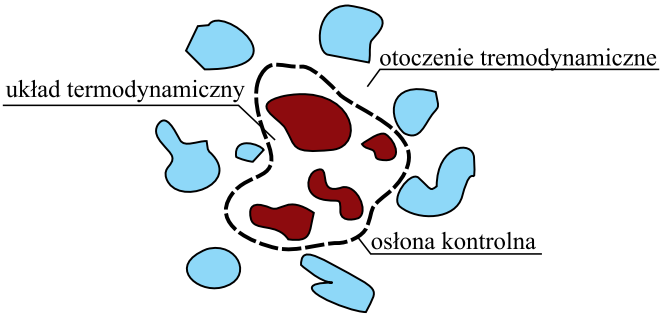
Substancja biorąca udział w procesach termodynamicznych nazywana jest *czynnikiem termodynamicznym*. Substancje mające jednakowe właściwości fizyczne we wszystkich kierunkach nazywamy *izotropowymi*, pozostałe *nieizotropowymi*.

Ilość substancji układu (zwana czasami licznością) jest określana przez liczbę atomów lub cząsteczek. Jej jednostką jest *mol*. *Jeden mol* substancji zawiera tyle cząsteczek co 12 g izotopu węgla ^{12}C ($6{,}0268 \cdot 10^{23}$). Najczęściej stosowaną jednostką jest kilomol (1 kmol = 1000 moli).

Z przytoczonej definicji wynika, że 1 kmol izotopu węgla ^{12}C ma masę 12 kg. W ogólności masa jednego kilomola substancji, wyrażona w kg, jest równa jej masie cząsteczkowej. Warto zapamiętać różnicę między ilością materii a masą. Pierwsze pojęcie odnosi się do liczby atomów lub cząstek, natomiast masa jest miarą bezwładności i oddziaływania grawitacyjnego.

1.2. Układ termodynamiczny

Układ termodynamiczny jest to wyodrębniony z przestrzeni (otoczenia termodynamicznego), za pomocą rzeczywistej lub wyimaginowanej osłony kontrolnej (bilansowej), obszar wypełniony materią (rys. 1.1). Osłona kontrolna może być stała lub ruchoma.



Rys. 1.1. Układ termodynamiczny

Ze względu na przenikliwość osłony kontrolnej rozróżnić można:
- *układy odosobnione* (*izolowane*), ograniczone od otoczenia osłoną, która uniemożliwia zarówno przepływ substancji, jak i energii,
- *układy otwarte*, w których przez osłonę kontrolną możliwy jest przepływ zarówno substancji, jak i energii:
  - *układy jednostronnie otwarte*, w których substancja przepływa tylko w jednym kierunku,
  - *układy przepływowe*, w których substancja może przepływać zarówno na zewnątrz, jak i do wewnątrz,
- *układy zamknięte*, w których przez osłonę kontrolną możliwy jest przepływ jedynie energii:
  - *układy z osłoną adiabatyczną*, w których osłona jest przenikliwa tylko dla energii,
  - *układy z osłoną diatermiczną*, w których osłona jest przenikliwa tylko dla ciepła.

Układ termodynamiczny może składać się z jednego lub więcej ciał. Ze względu na zawartość rozróżnić można:
- *układy jednoskładnikowe*,
- *układy wieloskładnikowe*,

oraz:
- *układy jednofazowe* (*homogeniczne, jednolite*), zawierające tylko jedną fazę substancji (np. tylko gazową),
- *układy wielofazowe* (*heterogeniczne*, *niejednolite*), zawierające różne fazy danej substancji,

a także:
- *układy jednorodne*, które mają takie same właściwości fizyczne i chemiczne w swojej całej objętości,
- *układy niejednorodne*:
  - *układy dyskretne*, których właściwości zmieniają się skokowo (np. istnienie w układzie kilku faz),

– *układy ciągłe*, w których zmiany właściwości zachodzą płynnie (np. zmiana temperatury).

1.3. Stan termodynamiczny. Zerowa zasada termodynamiki

Stan termodynamiczny to wartość wszystkich parametrów stanu w określonej chwili. Parametry stanu są wielkościami fizycznymi, za pomocą których możemy określić stan materii (np. temperaturę, objętość, ciśnienie). Wyróżnia się:

– *parametry ekstensywne* (*globalne*) określane dla całej objętości substancji. Ich wartość zmienia się wraz z ilością substancji (*są addytywne*). Do parametrów ekstensywnych należą m.in. masa, energia wewnętrzna, entalpia, entropia.
– *parametry intensywne* (*lokalne*) jednakowe dla całej objętości substancji lub tylko jej części. Ich wartość nie zależy od ilości. Do parametrów intensywnych zaliczyć można m.in. temperaturę i ciśnienie.

Parametry stanu obliczone na podstawie parametrów, które można zmierzyć bezpośrednio nazywamy *funkcjami stanu*.

Stan termodynamiczny substancji może być charakteryzowany przez parametry intensywne. Z parametrów ekstensywnych można utworzyć parametry intensywne poprzez odniesienie ich do jednostki masy lub objętości substancji (tzw. *parametry właściwe*).

Stan, w którym parametry układu, takie jak ciśnienie, objętość i wszystkie funkcje stanu są stałe w czasie, nazywamy *ustalonym stanem równowagi termodynamicznej*. Układy mogące ze sobą wymieniać energię są w stanie równowagi termodynamicznej, jeśli mają jednakowe intensywne parametry stanu.

Z pojęciem równowagi termodynamicznej wiąże się zasada tranzytywności równowagi termicznej zwana **Zerową zasadą termodynamiki**: „*Dwa ciała znajdujące się w równowadze termicznej z trzecim ciałem są także w równowadze termicznej między sobą*”.

1.4. Przemiana termodynamiczna

Przemiana termodynamiczna jest to zmiana stanu układu polegająca na przejściu od jednego stanu, zwanego początkowym, do drugiego, zwanego końcowym, poprzez conitnuum stanów pośrednich.

Przemiana jest *odwracalna*, jeśli od jej stanu końcowego do początkowego można powrócić w taki sposób, że również w otoczeniu zostanie przywrócony stan pierwotny. Należy jednak pamiętać, że rzeczywiste zjawiska fizyczne są to procesy *nieodwracalne*.

Odwzorowaniem przemiany jest linia ciągła łącząca kolejne punkty od stanu początkowego do stanu końcowego. Równanie linii przemiany nazywamy *równaniem przemiany*. Pomiędzy dwoma stanami czynnika termodynamicznego można zrealizować nieskończenie wiele przemian termodynamicznych. W tym sensie mówimy o *ciągłości przemiany*.

1.5. Temperatura

Temperatura jest to skalarna wielkość fizyczna charakteryzująca stan równowagi termodynamicznej układu makroskopowego. Jest ona miarą stopnia nagrzania ciał i w termodynamice jest parametrem stanu. Temperatura jest również związana ze średnią energią kinetyczną ruchu i drgań wszystkich cząsteczek tworzących dany układ – temperatura rośnie, kiedy wzrasta energia tych ruchów.

1.5.1. Pomiar temperatury

Do pomiaru temperatury możemy wykorzystać każdy układ fizyczny, którego jakaś właściwość silnie zależy od temperatury, a pozostałe właściwości są w przybliżeniu niezmienne. Właściwość taką nazywamy *parametrem termometrycznym*. I tak na przykład zależność objętości gazów od temperatury (rozszerzalność termiczna gazów) wykorzystana została w konstrukcji termometrów gazowych, a rozszerzalność termiczna cieczy – w termometrach cieczowych. Zależność oporu elektrycznego od temperatury pozwoliła na skonstruowanie termometrów oporowych.

1.5.2. Skale temperatury

Termodynamiczna definicja temperatury pozwala porównywać jej wartości, ale nie określa jej skali. Na przykład nie określa, kiedy temperatura jednego ciała jest dwa razy wyższa od temperatury drugiego. Dlatego też tworzone są skale temperatury zawierające charakterystyczne jej wartości oraz odpowiadające im zjawiska określające stan cieplny.

Najstarszą znaną skalą temperatury, do dziś używaną w krajach anglosaskich, jest *skala Fahrenheita* zaproponowana w 1724 r. Fahrenheit przyjął, że temperatura mieszaniny wody z lodem i solą wynosi 0°F, a mieszanina wody z lodem ma temperaturę 32°F.

Podstawową skalą stosowaną obecnie na świecie jest *skala Celsjusza*, który wprowadził ją w 1742 r. Ciekawostką jest, że Celsjusz przyjął oznaczenia odwrotne do używanych obecnie. Temperatura topniejącego lodu wynosiła u niego 100°C, a temperatura wrzenia wody 0°C. „Odwrócenia” skali dokonał przyrodnik Karol Linneusz lub producent termometrów Daniel Ekström w 1850 r.

Zależność między wartością temperatury wyrażoną w stopniach Celsjusza a wartością temperatury wyrażoną w stopniach Fahrenheita opisują równania 1.1 i 1.2.

$$t_{[°F]} = \frac{9}{5} \cdot t_{[°C]} + 32 \quad [°F] , \tag{1.1}$$

$$t_{[°C]} = \frac{9}{5} \cdot (t_{[°F]} - 32) \quad [°C] , \tag{1.2}$$

gdzie:
$t_{[°C]}$ – temperatura wyrażona w stopniach Celsjusza, °C,
$t_{[°F]}$ – temperatura wyrażona w stopniach Fahrenheita, °F.

W *skali bezwzględnej* zero zdefiniowane jest jako temperatura gazu idealnego, w której będzie miał on zerową objętość przy dowolnym ciśnieniu. Z punktu widzenia mikroskopowego odpowiada to sytuacji, gdy wszelki ruch cząsteczek gazu ustaje. W rzeczywistości jednak objętości cząsteczek gazu są niezerowe, co oznacza, że rzeczywistym termometrem gazowym nie można mierzyć dowolnie niskiej temperatury.

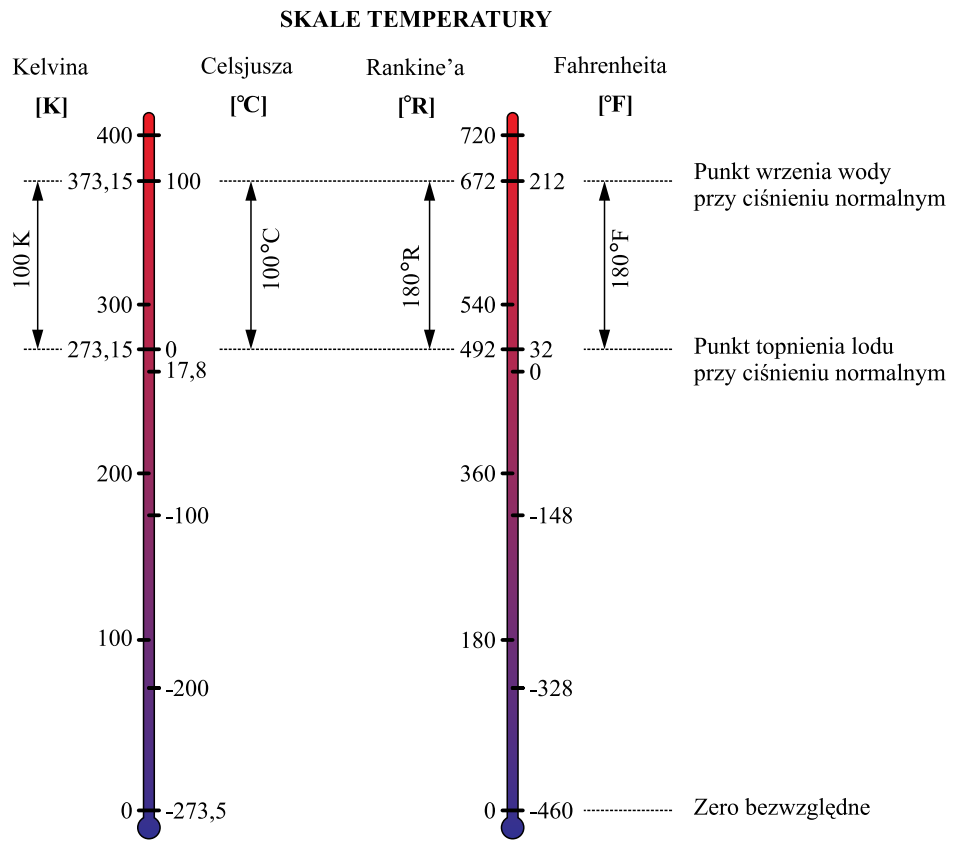
Temperatura zera bezwzględnego jest to najniższa temperatura jaką mogą uzyskać ciała. W temperaturze tej wszystkie cząsteczki mają najmniejszą możliwą energię. Według mechaniki klasycznej ruch cząsteczek całkowicie ustaje, a według mechaniki kwantowej wszystkie cząsteczki znajdują się w stanie podstawowym, wykonując tzw. drgania zerowe. W temperaturze zera bezwzględnego wszystkie ciała są w stanie stałym. Wyjątkiem jest hel, który w pewnym zakresie ciśnienia pozostaje cieczą w dowolnie niskiej temperaturze.

Na podstawie stosowanych powszechnie skal temperatury zdefiniowano nowe, tak by ich zero odpowiadało temperaturze zera bezwzględnego. Jest to skala Kelvina, odpowiadająca skali Celsjusza oraz skala Rankine'a, odpowiadająca skali Fahrenheita. Zależność między wartością temperatury wyrażoną w skali Celsjusza i wartością temperatury wyrażoną w skali Kelvina przedstawia równanie (1.3), natomiast zależność między wartością temperatury wyrażoną w skali Fahrenheita i wartością temperatury wyrażoną w skali Rankine'a – równanie (1.4.). Porównanie podstawowych skal temperatury pokazano na rys. 1.2.

$$T_{[K]} = t_{[°C]} + 273{,}15 \quad [K] \tag{1.3}$$

$$T_{[°R]} = t_{[°F]} + 459{,}67 \quad [°R] , \tag{1.4}$$

gdzie:
$t_{[°C]}$ – temperatura wyrażona w stopniach Celsjusza, °C,
$t_{[°F]}$ – temperatura wyrażona w stopniach Fahrenheita, °F,
$T_{[K]}$ – temperatura wyrażona w Kelvinach, K,
$T_{[°R]}$ – temperatura wyrażona w stopniach Rankine'a, °R.



Rys. 1.2. Podstawowe skale temperatury

Istotą współczesnej termometrii jest zarówno prowadzenie nieustających prac nad skalą termodynamiczną temperatury, którą wyznaczają definicyjne punkty stałe i odpowiadające im wartości temperatury, jak i doskonalenie urządzeń do odtwarzania tych punktów. Na przestrzeni lat zmiany międzynarodowych skal temperatury odzwierciedlały dynamiczny postęp techniczny w zakresie technik pomiarowych, konstrukcji przyrządów i urządzeń oraz stosowanych materiałów.

Aktualnie obowiązująca skala MST-90, przyjęta przez Międzynarodową Konferencję Miar w 1989 r., zaczęła obowiązywać od 1 stycznia 1990 r. Jednostką w tej skali jest Kelvin, który jest równy stopniowi Celsjusza. Temperatura zamarzającej wody jest w tej skali równa 273,16 K, a temperatura wrzenia wody 373,16 K. W tabl. 1.1 podano wartości temperatury wg MST-90 dla punktów charakterystycznych wybranych substancji.

Tablica 1.1. Definicyjne punkty stałe MST-90

Temperatura		Substancja [(a)]	Rodzaj punktu [(b)]
T [K]	t [°C]		
od 3 do 5	od -270,15 do -268,15	^{3}He	V
13,8033	-259,3467	e-H_2	T
około 17	-256,15	e-H_2 (lub He)	V (lub G)
około 20,3	-252,85	e-H_2 (lub He)	V (lub G)
24,5561	-248,5939	Ne	T
54,3584	-218,7916	O_2	T
83,8058	-189,3442	Ar	T
234,3156	-38,8344	Hg	T
273,16	0,01	H_2O	T
302,9146	29,7646	Ga	M
429,7485	156,5985	In	F
505,078	231,928	Sn	F
692,677	419,527	Zn	F
933,473	660,323	Al	F
1234,93	961,78	Ag	F
1337,33	1064,18	Au	F
1357,77	1084,62	Cu	F

(a) – wszystkie substancje, z wyjątkiem ^{3}He, mają naturalny skład izotopowy; e-H_2 oznacza wodór o składzie odpowiadającym równowadze między odmianami molekularnymi „orto" i „para",

(b) – symbole mają następujące znaczenia: V – ciśnienie pary nasyconej, T – punkt potrójny (temperatura, w której faza stała, ciekła i gazowa znajdują się w stanie równowagi), G – punkt realizowany z zastosowaniem termometru gazowego, M, F – punkt topnienia, punkt krzepnięcia odpowiednio (temperatura, przy ciśnieniu 101325 Pa, w której faza stała i ciekła znajdują się w stanie równowagi).

1.6. Ciśnienie

Ciśnienie jest to wielkość skalarna określona jako równomiernie rozłożona siła działająca prostopadle do powierzchni podzielona przez powierzchnię na jaką ona działa, co przedstawia zależność

$$P = \frac{F_n}{S} \quad [\mathrm{Pa}] \tag{1.5}$$

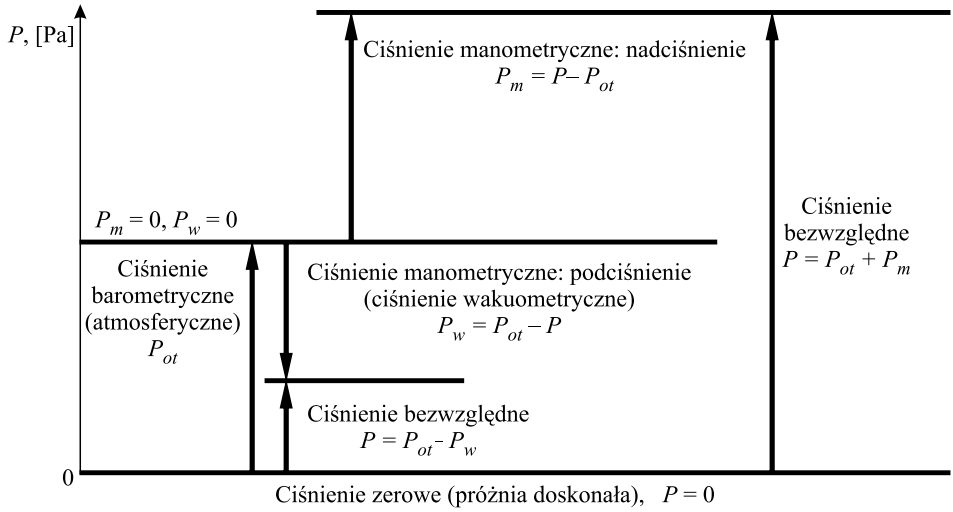
gdzie:
F_n – siła prostopadła do powierzchni, N,
S – powierzchnia, m^2.

W przypadku gazów w stanie ustalonym w spoczynku, ciśnienie jakie gaz wywiera na ścianki naczynia można przedstawić jako funkcję objętości, masy i temperatury. W termodynamice ciśnienie jest więc traktowane jako parametr stanu.

1.6.1. Pomiar ciśnienia

Wartość mierzonego ciśnienia zależy od przyjętego poziomu odniesienia. Ciśnienie zmierzone względem próżni (P) jest nazywane *ciśnieniem absolutnym* lub *bezwzględnym*. *Ciśnienie manometryczne* (P_m) jest to różnica ciśnienia absolutnego i ciśnienia otoczenia, którym najczęściej jest *ciśnienie atmosferyczne* (P_{ot}).

Ciśnienie manometryczne może przyjmować wartości większe od zera i wówczas mówi się o nadciśnieniu lub wartości mniejsze od zera i wówczas mówi się o podciśnieniu lub ciśnieniu wakuometrycznym. Wzajemne zależności między omówionymi ciśnieniami pokazano na rys. 1.3.



Rys. 1.3. Interpretacja graficzna ciśnienia

1.6.2. Jednostki ciśnienia

Ze względów historycznych ciśnienie w technice jest podawane w różnych jednostkach. Jednostką ciśnienia w układzie SI jest Paskal. Poniżej opisano pozostałe jednostki ciśnienia, a przeliczniki między jednostkami podano w tabl. 1.2.

1) **Atmosfera techniczna** [at]. Ciśnienie o wartości 1 at oznacza, że na powierzchnię 1 cm^2 działa siła 1 kG (siła z jaką w wyniku grawitacji ziemskiej jest przyciągana masa 1 kg).
2) **Atmosfera fizyczna** (atmosfera normalna) [atm]. Jest to jednostka ciśnienia równa ciśnieniu 760 milimetrów słupa rtęci (mmHg) w temperaturze 273,16 K (0°C). Atmosfera fizyczna odpowiada średniemu ciśnieniu atmosferycznemu na poziomie morza.
3) **Bar** [bar]. Jest to jednostka ciśnienia w układzie jednostek CGS (Centymetr Gram Sekunda – nazywanym bezwzględnym układem jednostek – zastąpio-

nym przez układ SI) określona jako 10^6 dyn/cm^2 (dyna –siła nadająca ciału o masie 1 g przyspieszenie równe 1 cm/s^2).

4) **Milimetr słupa wody** [mmH_2O]. Jest to jednostka miary ciśnienia równa ciśnieniu słupa wody o wysokości 1 mm w temperaturze 273,16 K (0°C).
5) **Funt na cal kwadratowy** (Pound per square inch) [PSI]. Jest to jednostka pochodna ciśnienia w brytyjskim systemie miar (siła przyciągania ziemskiego masy 1 funta [P] do powierzchni 1 cala^2).
6) **Tor** [Tr], [mmHg]. Jest to jednostka ciśnienia równa ciśnieniu słupa rtęci o wysokości 1 mm w temperaturze 273,16 K (0°C) przy normalnym przyspieszeniu ziemskim.

Tablica 1.2. Przeliczniki jednostek ciśnienia

Jednostka	Jednostki zamienne						
	at	atm	bar	mmH_2O	Pa	PSI	Tr (mmHg)
at	1,0000	0,9678	0,9807	10000,0000	98066,5000	14,2233	735,5592
atm	1,0332	1,0000	1,0132	10332,2745	101325,0000	14,6959	760,0000
bar	1,0197	0,9869	1,0000	10197,1621	100000,0000	14,5038	750,0617
mmH_2O	0,0001	0,0001	0,0001	1,0000	9,8067	0,0014	0,0736
Pa	0,00001	0,00001	0,00001	0,0075	1,0000	0,00015	0,00750
PSI	0,0703	0,0680	0,0689	703,0696	6894,7573	1,0000	51,7149
Tr (mmHg)	0,0014	0,0013	0,0013	13,5951	133,3224	0,0193	1,0000

1.7. Przykłady

Przykład 1.1. Ciśnienie atmosferyczne wynosi 800 Tr. Manometr wskazuje nadciśnienie 5,5 atm. Obliczyć ciśnienie bezwzględne; wynik podać w kPa.

Dane:
P_{ot} = 800 Tr
P_m = 5,5 atm

Szukane:
P = ... kPa

$$P = P_{ot} + P_m$$

Rozwiązanie:

1. Przeliczenie ciśnień na kPa z wykorzystaniem tabl. 1.2.

$$P_{ot} = 800 \cdot 133{,}3224 = 106657{,}9 \text{ Pa} = 106{,}658 \text{ kPa}$$
$$P_m = 5{,}5 \cdot 101325 = 557287{,}5 \text{ Pa} = 557{,}288 \text{ kPa}$$

2. Obliczenie ciśnienia bezwzględnego

$$\underline{P} = P_{ot} + P_m = 106{,}658 + 557{,}288 = 663{,}945 \text{ kPa}$$