



WYŻSZE
ZAWODOWE
STUDIA
TECHNICZNE
DLA
PRACUJĄCYCH

**JAN KURZYŃSKI
STANISŁAW MAŃKOWSKI
MARIAN RUBIK**

**zbiór
zadań
z techniki
cieplnej**

WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

**JAN KURZYŃSKI
STANISŁAW MAŃKOWSKI
MARIAN RUBIK**

**ZBIÓR
ZADAŃ
Z TECHNIKI
CIEPLNEJ**

WpW WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA 1973

opiniodawca

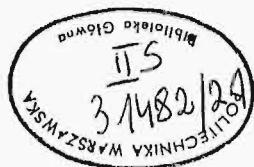
prof. dr JAN MADEJSKI

skrypt opracowali

dr inż. JAN KURZYŃSKI rozdz. 8–12

dr inż. STANISŁAW MAŃKOWSKI rozdz. 1–7

mgr inż. MARIAN RUBIK rozdz. 13



opracowanie redakcyjne

ELŻBIETA KAMIŃSKA

WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Warszawa 1973. Wydanie drugie poprawione.

Wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Warszawskiej

Nakł. 1500+30. Ark. wyd. 18,7. Ark. druku 25,5. Pap. offset kl. III 70 g.

Oddano do druku dnia 12. XII. 1972 r. Zamówienie nr 1005. A-92.

TREŚĆ

Przedmowa	4
1. Podstawowe wielkości fizyczne i ich jednostki w międzynarodowym układzie SI	5
2. Bilanse energetyczne. I zasada termodynamiki	14
3. Właściwości gazów	21
4. Mieszanki gazów	35
5. Przemiany charakterystyczne gazów doskonałych i półdoskonałych	59
6. II zasada termodynamiki	92
7. Sprężarki tłokowe	105
8. Para wodna	123
9. Wilgotne powietrze	166
10. Spalanie	212
11. Obiegi siłowni ciepłych	233
12. Wymiana ciepła	252
13. Chłodnictwo	348
Tablice	364
Literatura	393

PRZEDMOWA

Podstawowym warunkiem opanowania zagadnień związanych z urządzeniami cieplnymi i zdrowotnymi w inżynierii sanitarnej jest znajomość podstaw techniki cieplnej.

Jak wykazuje obserwacja, opanowanie podstaw teoretycznych tej dyscypliny bez umiejętności praktycznego jej zastosowania nie przynosi żadnej korzyści w praktyce inżynierskiej.

Studenci studiów dla pracujących muszą w bardzo ograniczonej liczbie godzin przyswoić sobie umiejętność rozwiązywania konkretnych problemów z dziedziny techniki cieplnej.

W celu ułatwienia korzystania ze skryptu, każdy z rozdziałów poprzedzony został podstawami teoretycznymi, których opanowanie jest niezbędne przed rozwiązywaniem zadań. Ponadto typowe oraz trudniejsze zadania zostały podane wraz z pełnymi rozwiązaniami.

W skrypcie zastosowano międzynarodowy układ jednostek SI. Dlatego też w rozdziale pierwszym podano zależności pozwalające przeliczać jednostki z układów dotychczas stosowanych na układ SI.

Umiejętność przeliczania jednostek jest szczególnie ważna w okresie przejściowym, w którym jeszcze np. przyrządy pomiarowe wycechowane są w jednostkach starych. Wobec braku w ogólnie dostępnej literaturze technicznej materiałów tablicowych w układzie SI skrypt został uzupełniony niezbędnymi tablicami.

Oddając do rąk studentów ten zbiór zadań sądzimy, że będzie on pomocny przy przygotowaniu się do egzaminów, jak również będzie spełniał rolę poradnika w ich pracy zawodowej.

Stosowane w przeszłości różne układy jednostek (CGS, MKGS, mieszany) ustalały często dla jednej wielkości fizycznej kilka jednostek. Stan ten stwarzał wiele trudności w pamięciowym opanowaniu materiału oraz w przeprowadzaniu obliczeń. Istniejące rozbieżności terminologiczne i różne interpretacje tych samych pojęć powodowały dodatkowy chaos w naukach technicznych. W tym stanie rzeczy, szczególnie przekazywanie informacji z różnych ośrodków naukowych było bardzo utrudnione.

Z tego względu IX Generalna Konferencja Miar w 1960 r. zaleciła stosowanie jednego zunifikowanego układu jednostek miar SI (System International).

W Polsce układ SI został wprowadzony rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 23.VI.1966 r. oraz zarządzeniem Prezesa Centralnego Urzędu Miar z dnia 21.XII.1966 r.

Wybór jednostek podstawowych układu SI był wynikiem szczegółowej analizy funkcjonalności układów jednostek powszechnie stosowanych. Ustalono sześć jednostek podstawowych dla następujących wielkości fizycznych: długości masy, czasu, natężenia prądu elektrycznego, temperatury w bezwzględnej skali termodynamicznej i światłości oraz dwie jednostki uzupełniające dla kąta płaskiego i bryłowego.

W tablicy ¹⁾ podano jednostki podstawowe i uzupełniające wraz ze stosowanymi nazwami wielkości i oznaczeniami jednostek. Wielokrotność i podwielokrotność jednostek w układzie dziesiętnym wyraża się przez dodanie odpowiednio do nazwy jednostki miary przedrostków lub ich oznaczeń. Nazwy wielokrotności i podwielokrotności zostały podane w tablicy 2.

¹⁾ Tablice znajdują się na str. 364..

Jednostki masy

Podstawową jednostką masy jest 1 kg, którego wzorzec znajduje się w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres.

Jednostką wielokrotną najczęściej używaną jest tona (1t = 10³ kg), a podwielokrotną - gram (1g = 0,001 kg).

Techniczną jednostką masy układu MkGS był

$$1 \text{ inert} = \frac{1 \text{ kG s}^2}{1 \text{ m}^2} = 9,80665 \text{ kg}.$$

Przeliczenie tej jednostki było tak kłopotliwe, że nie znalazła ona większego zastosowania. W technice cieplnej często używaną i bardzo wygodną jednostką ilości substancji jest 1 kmol (kilogramocząsteczka). Jednostka ta, różna dla różnych pierwiastków czy związków chemicznych, wyraża się liczbą kilogramów masy równą względnej masie cząsteczkowej. Jeden kilomol jakiegokolwiek związku czy pierwiastka w fazie gazowej, w warunkach równych temperatur i ciśnień, zajmuje jednakową objętość (np. 22,4 m³ przy T = 273°K i p = 0,9807·10⁵ N/m²). Ponadto 1 kmol dowolnego związku zawiera jednakową ilość cząsteczek określonych liczbą Avogadra: 6,0232·10²⁶ cząsteczek/kmol oraz dla różnych gazów (doskonałych) ma jedną uniwersalną stałą gazową B = 8314,7 J/(kmol·deg). Przeliczając masę m(kg) na ilość materii n(kmol) należy posługiwać się zależnościami:

$$n = \frac{m}{M_B} \quad [\text{kmol}], \quad (1.1)$$

przy czym liczbowo

$$M_B = \mu, \quad (1.2)$$

gdzie: M_B - równoważnik kilomola w kilogramach masy, kg/kmol,

μ - względna masa cząsteczkowa

Gęstość (masę właściwą) określa stosunek

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3], \quad (1.3)$$

gdzie: V - objętość w m³ zajmowana przez m kg masy.

Podając gęstość należy informować przy jakim ciśnieniu i temperaturze została ona określona.

Odwrotnością gęstości jest objętość właściwa

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \left[\text{m}^3/\text{kg} \right]. \quad (1.4)$$

W tabeli 3 podano ważniejsze właściwości fizyczne niektórych czynników termodynamicznych.

Jednostki temperatury

Stopień Kelvina jest jednostką temperatury termodynamicznej. W skali tej temperatura punktu potrójnego wody jest równa dokładnie $273,16^\circ\text{K}$.

Pojęcie temperatury obecnie wyprowadza się na podstawie kinetyczno-cząsteczkowej teorii budowy materii oraz praw termodynamiki. Temperatura jest miarą wielkości energii kinetycznej ruchu translacyjnego cząsteczek danego ciała, przy czym im wyższa jest ta energia, tym wyższa jest temperatura danego ciała.

Objętość gazu doskonałego pod stałym ciśnieniem jest funkcją liniową temperatury i wynosi:

$$V = V_0(1 + \alpha t), \quad (1.5)$$

gdzie: V_0 - objętość gazu w temp. $t = 0^\circ\text{C}$,

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ współczynnik rozszerzalności objętościowej gazu, } \text{deg}^{-1}.$$

W temperaturze $t = -273,15^\circ\text{C}$ ustaje ruch cieplny cząsteczek gazu doskonałego osiągając stan, przy którym $V = 0$. Stan ten odpowiada temperaturze zera bezwzględnego ($T = 0^\circ\text{K}$).

Ponieważ za jedyny punkt odniesienia w skali bezwzględnej przyjęto punkt potrójny wody destylowanej, któremu odpowiada temperatura $0,01^\circ\text{C} = 273,16^\circ\text{K}$, skala ta jest bardziej jednoznacznie określona od skali Celsjusza, którą oparto na dwóch punktach wzorcowych, temperaturze równowagi ciekłej i stałej wody (0°C) i temperaturze równowagi fazy ciekłej i gazowej wody (100°C) przy ciśnieniu $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (760 mmHg).

Temperaturę w skali bezwzględnej oznacza się symbolem T :

$$T = 273,15 + t \approx 273 + t \left[^\circ\text{K} \right], \quad (1.6)$$

gdzie: t - temperatura $[^\circ\text{C}]$.

Różnicę temperatur oznacza się symbolem deg.

Jednostki siły

Siła równa jest iloczynowi masy ciała i przyspieszenia:

$$F = m \cdot a. \quad (1.7)$$

W układzie SI jednostką siły jest niuton (N). Jest to siła, która masie 1 kg nadaje przyspieszenie 1m/s^2 .

Więc

$$1\text{N} = 1 (\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2. \quad (1.7a)$$

Jednostki wielokrotne i podwielokrotne tworzy się zgodnie z oznaczeniami podanymi w tabl. 2 np.: $1\text{kN} = 10^3\text{N}$, $1\text{MN} = 10^6\text{N}$ czy $1\text{dN} = 0,1\text{N}$, $\text{cN} = 0,01\text{N}$ itd.

W układzie MkGS jednostką siły jest 1 kG, czyli siła, z którą 1 kg masy ciała jest przyciągany przez ziemię w miejscu, gdzie przyspieszenie ziemskie $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Zatem:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kG} &= 9,80665 \text{ N} \approx 9,81 \text{ N}, \\ 1 \text{ N} &= 0,10197 \text{ kG} \approx 0,102 \text{ kG}. \end{aligned}$$

Stosowaną w układzie CGS jednostkę siły - dynę - przelicza się na jednostkę układu SI pamiętając, że:

$$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyn}$$

lub

$$1 \text{ mN} = 10^{-3} \text{ N} = 100 \text{ dyn}.$$

Ciężar ciała jest siłą równą iloczynowi masy ciała i lokalnego przyspieszenia ziemskiego, zatem jednostką ciężaru w układzie SI jest niuton. Lokalne przyspieszenie ziemskie dla terenów Polski wynosi $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$.

Współzależność pomiędzy niektórymi jednostkami siły podano w tablicy 4.

Jednostki ciśnienia

Jeżeli na element powierzchni ΔS działa siła ΔF skierowana prostopadle do niej oraz jeżeli ΔS stanowi otoczenie punktu A leżącego na tej powierzchni, to ciśnienie w punkcie A wynosi

$$p_A = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}. \quad (1.8)$$

W przypadku gdy siła F rozłożona jest równomiernie na powierzchnię S ,

$$p = \frac{F}{S} . \quad (1.8a)$$

Podstawową jednostką ciśnienia w układzie SI jest 1N/m^2 (paskal). Jednostka ta odpowiada sile 1N działającej na powierzchnię 1m^2 . Jednostki wielokrotne i podwielokrotne tworzy się zgodnie z oznaczeniami podanymi w tablicy 2, np. $1\text{kN/m}^2 = 10^3\text{N/m}^2$, $1\text{MN/m}^2 = 10^6\text{N/m}^2$ itp,

W układzie technicznym (MkGS) ciśnienie wyrażono w atmosferach technicznych (at):

$$1\text{ at} = 1\text{ kg/cm}^2 = 10^4\text{ kg/m}^2.$$

W naukach fizycznych używano inną jednostkę ciśnienia - atmosferę fizyczną (atm). Odpowiada ona ciśnieniu jakie wywiera na podstawę słup rtęci o temperaturze $T = 273,15^\circ\text{K}$ (0°C) i wysokości $h = 760\text{ mm}$ w polu grawitacyjnym, którego $g = 9,80665\text{ m/s}^2$.

Zależność pomiędzy 1 atm i 1 at jest następująca:

$$1\text{ atm} = 1,0332\text{ at} = 10332\text{ kg/m}^2.$$

W technice często ciśnienie podawane było w wysokości słupa jakiegokolwiek cieczy:

$$p = h \cdot g \cdot \rho_m \quad [\text{N/m}^2], \quad (1.9)$$

gdzie: h - wysokość słupa cieczy $[\text{m}]$;

ρ_m - gęstość cieczy manometrycznej $[\text{kg/m}^3]$;

g - lokalne przyspieszenie ziemskie $[\text{m/s}^2]$.

Mierząc ciśnienie wysokością słupa cieczy należy znać zarówno rodzaj cieczy jak i jej temperaturę w celu dokładnego określenia gęstości cieczy.

Ciśnienie wywierane przez słup rtęci o wysokości $h = 1\text{ mm}$, w temperaturze $T = 273,15^\circ\text{K}$ (0°C), przy $g = 9,80665\text{ m/s}^2$ nazywano torem (Tr):

$$1\text{ Tr} = 13,59\text{ kg/m}^2.$$

Stosowano też inną jednostkę zwaną barem, niewiele większą od atmosfery technicznej:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 \approx 1,02 \text{ at} \approx 750 \text{ Tr.}$$

W tablicy 5 podano współzależności pomiędzy najczęściej stosowanymi (do czasu wprowadzenia układu SI) jednostkami ciśnienia.

Jeżeli ciśnienie odniesione jest do ciśnienia otoczenia (barometrycznego) jako poziomu zerowego, to wtedy mówi się o tzw. nadciśnieniu (p_n) lub podciśnieniu (p_p). Tak zdefiniowane określenie nie jest jednoznaczne bez podania dokładnej wartości ciśnienia barometrycznego (b), gdyż ciśnienie to ulega wahaniom.

W termodynamice ciśnienie odnosi się do próżni bezwzględnej. Ciśnienie takie nazywa się ciśnieniem bezwzględnym (absolutnym) i oznacza się symbolem p .

Zależność pomiędzy nadciśnieniem i podciśnieniem a ciśnieniem barometrycznym wyrażają wzory:

$$p_n = p - b, \quad (1.10a)$$

$$p_p = b - p. \quad (1.10b)$$

Jednostki energii i pracy

Energię cieplną, wewnętrzną, kinetyczną, potencjalną czy elektryczną oraz pracę w układzie SI wyraża się za pomocą tych samych jednostek.

Równanie definicyjne pracy ma postać:

$$L = F l, \quad (1.11)$$

gdzie: F - siła [N],

l - droga [m].

Podstawową jednostką pracy i energii jest dżul (J):

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 (\text{kg} \cdot \text{m}^2) / \text{s}^2.$$

W układzie MKGS jednostką pracy był kilogramometr (kGm):

$$1 \text{ J} = 0,10197 \text{ kGm}.$$

Pracę można wyznaczyć też opierając się na definicyjnym równaniu mocy (N), wtedy

$$L = N \cdot \tau, \quad (1.12)$$

skąd wynika, że $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ (watosekunda) oraz (kilowatogodzina) $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \cdot 10^6 \cdot \text{J}$.

Energię cieplną w układzie MkGS wyrażano w kilokaloriach (kcal). Kilokalorią fizyczną (15-stopniowa) nazywano ilość ciepła, którą należy doprowadzić 1 kg wody destylowanej, aby ogrzać ją od $14,5^\circ\text{C}$ do $15,5^\circ\text{C}$.

Kalorię międzynarodową (kcal_{IT}) określano jako ilość ciepła równą $860^{-1} \text{ kW} \cdot \text{h}_{IT}$ międzynarodowej. Przy czym

$$1 \text{ kcal}_{IT} = \frac{1}{860} \text{ kW} \cdot \text{h}_{IT} = 4186,8 \text{ J} = 426,935 \approx 427 \text{ kGm}.$$

Przeprowadzając obliczenia procesów termodynamicznych warto zapamiętać podane niżej wartości:

- równoważnik kilokalorii $= 4,1868 \text{ kJ/kcal}$,
- cieplny równoważnik $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 860 \text{ kcal/(kW} \cdot \text{h)}$,
- cieplny równoważnik pracy $1 \text{ kGm}, A = \frac{1}{427} \text{ kcal/kGm}$.

Porównanie jednostek pracy i energii podano w tabeli 6.

Jednostki mocy

Moc określona jest stosunkiem pracy do czasu, w którym ta praca została wykonana:

$$N = \frac{L}{\tau}. \quad (1.13)$$

Jeżeli w ciągu jakiegoś odcinka czasu moc ulega zmianom, określa się wtedy tzw. moc chwilową urządzenia będącą stosunkiem różniczki pracy do elementarnego odcinka czasu:

$$N = \frac{dL}{d\tau}.$$

Podstawową jednostką mocy w układzie SI jest wat (W):

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 (\text{kg} \cdot \text{m}^2) / \text{s}^3.$$

Najczęściej stosowanymi jednostkami wielokrotnymi są:

- kilowat $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$,
- megawat $1 \text{ MW} = 10^3 \text{ kW} = 10^6 \text{ W}$.

Ilość wymienianej energii cieplnej określano wydajnością cieplną urządzenia Q w kcal/h. Zgodnie z założeniami układu SI ilość wymienionego ciepła w J lub kJ w ciągu jednej sekundy określa się mocą cieplną urządzenia Q w W lub kW. Przy ustalonych warunkach wymiany ciepła moc cieplna urządzenia wynosi:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\tau} \quad [\text{W}]. \quad (1.14)$$

Z poprzednio podanych zależności wynika, że

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = \frac{4186,8 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 1,163 \text{ W}.$$

Jednostki natężenia przepływu

Chcąc wyznaczyć ilość przepływającego płynu w jednostce czasu należy określić jego natężenie przepływu, masowe lub objętościowe.

Objętościowe natężenie przepływu określa wzór:

$$\dot{V} = \frac{V}{\tau} = S \cdot w \quad [\text{m}^3/\text{s}].$$

Masowe natężenie przepływu oblicza się z zależności:

$$\dot{m} = \frac{m}{\tau} = \dot{V} \cdot \rho = \frac{\dot{V}}{v} \quad [\text{kg/s}],$$

przy czym: \dot{V} - objętość (m^3) przepływającego płynu w czasie τ [s],

\dot{m} - masa (kg) przepływającego płynu w czasie τ [s],

ρ, v - gęstość i objętość właściwa płynu $[\text{kg}/\text{m}^3]$,
 $[\text{m}^3/\text{kg}]$,

S - pole przekroju poprzecznego kanału wypełnionego $[\text{m}^2]$,

w - średnia prędkość płynu w kanale $[\text{m/s}]$.

Podstawowe jednostki w wymianie ciepła

Poniżej zostały podane podstawowe jednostki w układzie SI stosowane w teorii wymiany ciepła oraz porównanie ich z jednostkami układu mieszanego:

Gęstość strumienia cieplnego (q) równa jest ilorazowi mocy cieplnej (strumienia cieplnego) i pola powierzchni izotermicznej prostopadłej do kierunku przepływu ciepła:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S},$$

przy czym q wyrażane jest w W/m^2 ;

$$1 \text{ kcal}/(m^2 \cdot h) = \frac{4186,8 \text{ J}}{3600 \text{ m}^2 s} = 1,163 \text{ W}/m^2.$$

Współczynnik przewodności cieplnej (λ) odpowiada takiej ilości ciepła wyrażonej w J, która w czasie 1 s przepłynie przez 1 m^2 powierzchni izotermicznej przy grubości ścianki 1 m, jeżeli różnica temperatur powierzchni izotermicznej wynosi 1 deg. Współczynnik λ wyraża się w $W/(m \cdot \text{deg})$

$$1 \text{ kcal}/(m \cdot h \cdot \text{deg}) = 1,163 \text{ W}/(m \cdot \text{deg}).$$

Współczynnik przejmowania ciepła (α) określa ile ciepła zostanie przejęte przez 1 m^2 powierzchni w czasie 1 s, gdy różnica temperatur pomiędzy płynem a ścianką wynosi 1 deg. Współczynnik przejmowania wyraża się w $W/(m^2 \cdot \text{deg})$

$$1 \text{ kcal}/(m^2 \cdot \text{deg}) = 1,163 \text{ W}/(m^2 \cdot \text{deg}).$$

Współczynnik przenikania ciepła k wyraża się w układzie SI w $W/(m^2 \cdot \text{deg})$, przy czym tak jak poprzednio

$$1 \text{ kcal}/(m^2 \cdot h \cdot \text{deg}) = 1,163 \text{ W}/(m^2 \cdot \text{deg}).$$

Jednostką stałej promieniowania ciała doskonale czarnego C jest $W/(m^2 \cdot ^\circ K^4)$

$$C = 4,9 \text{ kcal}/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ K^4) = 5,7 \text{ W}/(m^2 \cdot ^\circ K^4).$$