

JERZY WYRWAŁ

**TERMODYNAMICZNE
PODSTAWY FIZYKI
BUDOWLI**

Tajemnicą sukcesu i satysfakcji w nauce nie są ani zdolności matematyczne, ani pamięć faktów, ani umiejętność obserwacji, skądinąd wszystkie bardzo cenne. Element decydujący to ciekawość...

SPEYER E.: *Spadkobiercy Newtona*.
Amber, Warszawa 1997

WSTĘP

CEL WYKŁADÓW

Zapoznanie z podstawowymi postulatami i metodami **fenomenologicznej termodynamiki kontinuum** w zakresie potrzeb fizyki budowli.

ZAKRES WYKŁADÓW

Ogólne prawa **termodynamiki fenomenologicznej** rządzące procesami makroskopowymi we wszystkich materiałach (czyli równania bilansu masy, pędu, energii oraz nierówność wzrostu entropii).

SPIS TREŚCI

Wstęp

Opis fenomenologiczny
Wprowadzenie do termodynamiki
Modelowanie zjawisk fizycznych
Definicje matematyczne

1. Bilansowanie wielkości fizycznych

1.1. Ogólne równanie bilansu
1.2. Całkowe (globalne) równanie bilansu
1.3. Różniczkowe (lokalne) równanie bilansu
1.4. Wielkości zachowawcze
1.5. Równania fizyczne
1.6. Warunki początkowe i brzegowe

OŚRODKI JEDNOSKŁADNIKOWE

2. Masa

2.1. Kontinuum materialne
2.2. Ruch kontinuum
2.3. Gęstość masy
2.4. Bilans masy

3. Pęd

3.1. Klasyfikacja sił
3.2. Gęstość pędu
3.3. Bilans pędu

4. Energia

4.1. Klasyfikacja energii
4.2. Przemiany energii
4.3. Gęstość energii wewnętrznej
4.4. Bilans energii wewnętrznej
4.5. Prawo Fouriera
4.6. Równanie przenoszenia ciepła

5. Entropia

5.1. Gęstość entropii
5.2. Bilans entropii
5.3. Zasada wzrostu entropii

6. Materiał

OŚRODKI WIELOSKŁADNIKOWE

7. Mieszanina

7.1. Masa

7.2. Energia

7.3. Entropia

8. Ośrodek porowaty

8.1. Uśrednianie przestrzenne

8.2. Uśrednione równania bilansowe i fizyczne fazy

8.3. Uśrednione równania bilansowe i fizyczne ośrodka

8.4. Nienasycony ośrodek porowaty

9. Kondensacja pary wodnej

OPIS FENOMENOLOGICZNY

Opisywane przez fizykę zjawiska zachodzą w **makroskopowych ośrodkach materialnych** (ciałach stałych, cieczach i gazach) dostępnych naszemu poznaniu przy pomocy zmysłów.

Właściwości takich ośrodków określają charakterystyki **mikrocząstek** (atomów i molekuł), a wszystkie obserwowane zjawiska oraz prawa nimi rządzące są konsekwencją ruchu i oddziaływań tych cząstek.

W fizyce budowy bardzo często korzystamy z opracowanego w XIX wieku **opisu fenomenologicznego**.

Opis ten, bazujący na danych eksperymentalnych i nadający się dobrze do wielu zastosowań praktycznych, wymaga:

- analizy danych doświadczalnych i ich uogólnienia,
- zbudowania modelu matematycznego zjawiska.

Opis fenomenologiczny opiera się na założeniu **ciągłości zjawisk** zachodzących we wnętrzu obiektów makroskopowych i nie uwzględnia ich **złożonej**, rzeczywistej **struktury**.

Opis ten bazuje na pewnych podstawowych i **ogólnych związkach**, których postać nie zależy od konkretnych właściwości ciał materialnych. Zawiera dużo cennych informacji praktycznych.

Zalety opisu fenomenologicznego:

- ogólność,
- mocne ugruntowanie doświadczalne.

Wady opisu fenomenologicznego:

- konieczność wyznaczania wielu złożonych funkcji i współczynników materiałowych (niekiedy skomplikowanych i kosztownych),
- brak głębszej interpretacji fizycznej wprowadzanych pojęć i praw (nie pozwalają na zrozumienie mechanizmu konkretnego zjawiska oraz nie wyjaśniają jego natury).

WPROWADZENIE DO TERMODYNAMIKI

Termodynamika jest dyscypliną naukową, którą wykorzystujemy do badania **przemian energetycznych** zachodzących w makroskopowych ośrodkach materialnych.

Podstawą termodynamiki są **obserwacje** rzeczywistości fizycznej oraz nagromadzone **fakty doświadczalne**.

Ogólne prawa termodynamiki:

- **zasada zachowania energii**, która wyraża fizyczny fakt, że w żadnym realnym procesie termodynamicznym energia nie może być ani **tworzona**, ani **unicestwiana**;
- **zasada wzrostu entropii**, z której wynika, iż każdemu realnemu procesowi termodynamicznemu zawsze towarzyszy **degradacja energii**, polegająca na jej częściowym przekształcaniu w energię nieuporządkowanego ruchu mikrocząstek materii, czyli energię ich **ruchu cieplnego**.

Zadaniem termodynamiki jest analiza **zachowania i degradacji energii** podczas **procesów termodynamicznych** (wszelkiego rodzaju procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych).

W rzeczywistych (nieodwracalnych) procesach termodynamicznych przekształcane są różne postacie energii, przy czym część energii początkowej zostaje **rozproszona** (bezpowrotnie stracona) w postaci ciepła.

Entropia (CLAUSIUS) jest wielkością termodynamiczną opisującą stan **układu izolowanego** (obiektu fizycznego nie wymieniającego z otoczeniem ani materii, ani energii), który w drodze **ewolucji** (zmiany ukierunkowanej) znalazł się w stanie równowagi. W takim stanie entropia osiąga **maksymalną** możliwą **wartość**.

W przypadku **układów zamkniętych** (wymieniających z otoczeniem tylko energię) oraz **otwartych** (wymieniających z otoczeniem energię i materię) korzystamy z **energii swobodnej**. W stanie równowagi termodynamicznej energia swobodna przyjmuje **wartość minimalną**.

Entropia i energia swobodna są **potencjałami termodynamicznymi**, co oznacza, że ich wartości ekstremalne – minimum energii swobodnej i maksimum entropii – określają stan równowagi.

Termodynamika równowagowa (termostatyka GIBBSA) zakłada, że jeżeli proces termodynamiczny przebiega nieskończenie powoli – czyli jest procesem quasi-równowagowym – to rozpraszanie (**dyssypacja**) w nim nie występuje.

Termodynamika nierównowagowa zajmuje się badaniem układów poza stanem równowagi oraz **procesów nieodwracalnych**, jakim te układy podlegają.

Dzieli się ona **termodynamikę liniową** oraz **termodynamikę nieliniową**.

Termodynamika liniowa bada ewolucję procesów nierównowagowych w bliskim otoczeniu stanu równowagi i przyjmuje (**ONSAGER** – nagroda **NOBLA**), że **skutek** (zwany **przepływem termodynamicznym**) jest proporcjonalny do **przyczyny** (zwanej **bodźcem termodynamicznym**).

Termodynamika nieliniowa bada procesy termodynamiczne z dala od stanów równowagi. W stanach tych procesy nieodwracalne, a tym samym procesy rozpraszania energii, mogą doprowadzić do **wzrostu uporządkowania** układu i powstania zorganizowanych **struktur dyssypatywnych** (**PRIGOGINE** – nagroda **NOBLA**).

Przykładem może tu być **termodyfuzja**, kiedy to w naczyniu, zawierającym początkowo jednorodną mieszaninę dwóch gazów, następuje wskutek podgrzewania ich stopniowa separacja, czyli wzrost uporządkowania, objawiający się zgromadzeniem się gazu lżejszego w części cieplejszej naczynia, zaś gazu

cięższego – w jego części chłodniejszej.

Termodynamika kontinuum materialnego (ośrodka ciągłego) zajmuje się procesami w **obiektach materialnych**, które traktowane są jako zbiór oddziałujących ze sobą układów termodynamicznych.

Najmniejszym takim układem jest **cząstka materialna**, traktowana jako **układ jednorodny**, którego stan termodynamiczny opisują wielkości fizyczne zwane **parametrami termodynamicznymi**.

Rozpraszanie energii ujmuje **nierówność wzrostu entropii**, która w powiązaniu z **bilansami: masy, pędu, momentu pędu i energii** określa klasę **procesów dopuszczalnych** w kontinuum materialnym.

Zakłada się, że procesy fizyczne w kontinuum materialnym przebiegają tak wolno, że cząstki materialne znajdują się w stanie **lokalnej równowagi termodynamicznej** oraz:

- wszystkie parametry termodynamiczne, takie jak entropia, temperatura bezwzględna itp., są dobrze określone,
- dyssypacja energii ujmowana jest przez nierówność **CLAUSIUSA-DUHEMA**.

MODELOWANIE ZJAWISK FIZYCZNYCH

Istotą nauki jest odkrywanie w badanych **zjawiskach fizycznych** struktur i regularności oraz wynajdowanie sposobów opisu danych doświadczalnych.

Zjawiskami fizycznymi rządzą **prawa przyrody**, które są:

- uniwersalne,
- absolutne,
- ponadczasowe i wieczne,
- wszechwładne.

Chociaż nie rozumiemy istoty tych praw, ani też nie wiemy skąd się one wzięły, to powodują one, że materia i energia same z siebie organizują się w złożone formy i struktury, jakie obserwujemy wokół nas.

Prawa przyrody badamy przy pomocy **teorii naukowych**, które istnieją wyłącznie w naszym **umyśle** a nie w realnym **świecie**.

Teoria naukowa powinna:

- poprawnie opisywać zjawiska fizyczne, przy wykorzystaniu modelu zawierającego stosunkowo małą liczbę mierzalnych elementów,
- umożliwiać precyzyjne przewidywanie wyników przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych.

Między teorią a eksperymentem zachodzi **sprzężenie zwrotne**: techniki i narzędzia pomiarowe budujemy przy wykorzystaniu teorii, zaś teorię tworzymy opierając się na wynikach doświadczeń wykonanych przy pomocy tych narzędzi.

Każda teoria naukowa pozostaje zawsze **hipotezą**, której nie potrafimy nigdy udowodnić; możemy ją jedynie eksperymentalnie potwierdzić, lub jej zaprzeczyć.

Z teorii naukowej wynika **model matematyczny**, który pozwala lepiej i głębiej zrozumieć badane zjawisko, a także ująć je w zrozumiałej i zwartej formie matematycznej.

Budując taki model wykorzystujemy:

- **przedmiot** badań, będący obiektywnym elementem otaczającej nas rzeczywistości,
- **narzędzia** badawcze, czyli aparaturę doświadczalną oraz formalizm matematyczny pozwalający zapisać i uogólnić wyniki badań,
- nasz **zmysł** obserwacyjny oraz **umysł**, stojący pomiędzy narzędziami badawczymi a przedmiotem badań.

Matematyka jest najbardziej efektywnym i godnym zaufania narzędziem badawczym jakie znamy i wykorzystujemy do opisywania i zrozumienia wielu problemów naukowych fizyki.

Zajmuje się ona przede wszystkim badaniem **relacji** (czyli związków) pomiędzy **obiektami (strukturami) matematycznymi**, których natura ma znaczenie drugorzędne.

Z uwagi na swoje logiczne zasady, pozwala ona poruszać się w gąszczu obserwacji i faktów doświadczalnych, a przez ich uogólnienie, przedstawić idee fizyczne w postaci relacji matematycznych mających bardzo często duże znaczenie praktyczne.

Bez ścisłości i jednoznaczności matematyki nie do pomyślenia byłaby żadna działalność naukowa, gdyż matematyka jest dla każdego badacza i inżyniera gwarancją precyzji i obiektywności.

Na podkreślenie zasługuje niezbyt oczywisty fakt, że matematyka, która jest wytworem naszego umysłu, tak dobrze opisuje realny świat fizyczny.

Każdy model matematyczny zjawiska fizycznego musi zostać potwierdzony **badaniami eksperymentalnymi** ograniczonymi do **wielkości mierzalnych** (niemierzalne cechy badanego zjawiska znajdują się poza zasięgiem metod naukowych).

Chociaż metody doświadczalne bazują na ogólnych prawach i procedurach badawczych, to ich rezultaty zależą w głównej mierze od pomysłowości i szczególnych umiejętności badacza.

Żadna metodologicznie poprawna i racjonalna procedura badawcza nie usunie ryzyka wyciągnięcia mylnych, fałszywych bądź banalnych wniosków z przeprowadzonych eksperymentów i analiz uzyskanych wyników.

DEFINICJE MATEMATYCZNE

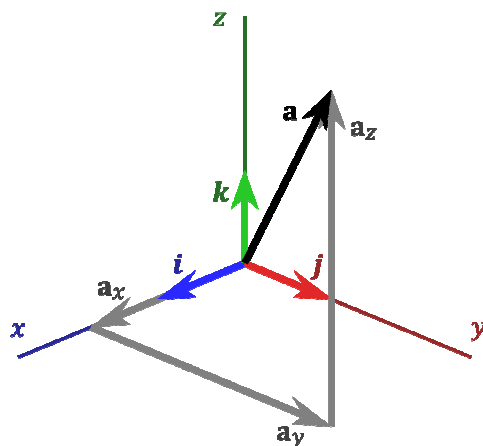
Kto martwi się o wzory? Są one naskórką matematyki, a nie jej istotą!

STEWART I.: *Czy Bóg gra w kości? Nowa matematyka chaosu.*
PWN, Warszawa 1995

Wektory (mała, pogrubiona czcionka)

Wykorzystywany w wykładach aparat matematyczny jest charakterystyczny dla termodynamiki i mechaniki płynów. Zapis wzorów w notacji **absolutnej** (niezależnej od układu odniesienia).

Niektóre wzory końcowe odniesione do **prostokątnego** układu odniesienia $Oxyz$, gdzie x, y, z są **współrzędnymi punktu** $\mathbf{x} = \mathbf{x}(x, y, z)$.



Rys. 1.1. Prostokątny układ odniesienia

Składowe i współrzędne wektora

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_x + \mathbf{a}_y + \mathbf{a}_z = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}$$

$\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$ – składowe wektora \mathbf{a} ,

a_x, a_y, a_z – współrzędne wektora \mathbf{a} ,

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – wersory (wektory jednostkowe) układu $Oxyz$.

Iloczyn skalarny wektorów

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

Gradient skalara (wektor)

$$\nabla a = \frac{\partial a}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial a}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial a}{\partial z} \mathbf{k}$$

Operator HAMILTONA (nabla)

$$\nabla \equiv \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

Pochodna normalna pola skalarnego (skalar)

$$\frac{\partial a}{\partial n} = \mathbf{n} \cdot \nabla a$$

**Dywergencja wektora (skalarna gęstość przestrzen-
na źródeł pola wektorowego)**

$$\nabla \cdot \mathbf{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$$

Operator LAPLACE'A (laplasjan)

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

**Twierdzenie o dywergencji (GAUSSA-
OSTROGRADSKIEGO)**

$$\int_{\Gamma} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} \, dA = \int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{a} \, dV$$

Tensory (duża, pogrubiona czcionka)

W celu ułatwienie zrozumienia pojęcia tensora rozważmy macierze

$$\{\mathbf{a}\} = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix}, \quad \{\mathbf{b}\} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix}, \quad [\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$$

oraz wektory \mathbf{a} i \mathbf{b} , oraz tensor \mathbf{T} , których współrzędne są elementami powyższych macierzy.

Pierwsza interpretacja tensora \mathbf{T} : odwzorowanie wektora \mathbf{a} w wektor \mathbf{b}

$$\mathbf{b} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{a} \rightarrow \{\mathbf{b}\} = [\mathbf{T}]\{\mathbf{a}\}$$

$$\begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_{11}a_1 + T_{12}a_2 \\ T_{21}a_1 + T_{22}a_2 \end{Bmatrix}$$

Druga interpretacja tensora: iloczyn tensorowy (diada) wektora \mathbf{a} i wektora \mathbf{b}

$$\mathbf{a}\mathbf{b} = \mathbf{T} \rightarrow \{\mathbf{a}\}\{\mathbf{b}\}^T = [\mathbf{T}]$$

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \{b_1 \quad b_2\} = \begin{bmatrix} a_1b_1 & a_1b_2 \\ a_2b_1 & a_2b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$$

Ślad tensora

$$\text{tr}\mathbf{T} = T_{11} + T_{22}$$