

JAN SZARGUT  
Katedra Energetyki Ciepłej

## PRAWO ZACHOWANIA ILOŚCI SUBSTANCJI

Streszczenie. Przy badaniu procesów fizycznych i chemicznych wykorzystuje się obok bilansu energetycznego tzw. bilans masowy. Prawa zachowania masy i zachowania energii nie są jednak niezależne. Równanie nazywane bilansem masowym wynika więc w istocie z prawa zachowania ilości substancji i powinno być nazywane bilansem substancjalnym. Wprowadzenie pojęcia ilości substancji stwarza konieczność rozróżnienia takich pojęć jak gęstość masy, gęstość substancji, gęstość ciężaru, masa właściwa.

### 1. Pojęcie ilości substancji

Pod terminem "materia" rozumiemy wszystko to, co posiada masę. Tak rozumiana materia może jednak występować w dwu postaciach: w postaci posiadającej masę spoczynkową i w postaci nie posiadającej masy spoczynkowej. Konieczne jest więc wprowadzenie odrębnych nazw dla tych dwu postaci materii. Zwykle postać pierwszą nazywa się substancją, postać zaś drugą (np. fotony promieniowania) materią polową [3]<sup>x)</sup>.

Ilość substancji można by najprościej określać przez podanie liczby i rodzaju atomów lub drobin [2]. Dlatego bardzo dogodną jednostką ilości substancji jest kilomol, który bez względu na rodzaj substancji zawiera jednakową liczbę drobin. Podobne zalety posiada normalny metr sześcienny, który również zawiera jednakową liczbę drobin bez względu na rodzaj substancji. Stosunek bowiem liczby normalnych metrów sześciennych do liczby kilomoli jest wielkością stałą niezależną od rodzaju substancji.

<sup>x)</sup> Spotyka się dotąd określanie materii polowej terminem "energia". Z drugiej strony wiadomo, że energia jest własnością wszystkich postaci materii, podobnie jak masa. To drugie znaczenie terminu energia jest bezsporne i powszechnie przyjęte. Oczywiście ten sam termin nie powinien być stosowany dla dwu nie pokrywających się zakresów pojęciowych. Stosowanie więc terminu "energia" dla zakresu pojęciowego nie obejmującego wszystkich postaci materii nie jest logicznie poprawne.

Kilomol lub normalny metr sześcienny można jednak stosować tylko do substancji o określonym wzorze chemicznym i określonym składzie izotopowym. Konieczne jest więc wprowadzenie jednostki bardziej uniwersalnej. Można w tym celu wykorzystać dowolną własność proporcjonalną w ustalonych warunkach do ilości substancji. Najdogodniej jest wyrażać ilość za pośrednictwem masy lub ciężaru [1], [2], [3].

Masa substancji zmienia się z jej poziomym energetycznym (zgodnie z teorią względności). Dlatego zaproponowano [3] by jako jednostkę ilości substancji stosować normalny kilogram nkg. Jest to ta ilość substancji, której masa spoczynkowa w znormalizowanych warunkach energetycznych<sup>x</sup>) (tzw. masa normalna) wynosi 1 kg.

Tak zdefiniowaną jednostkę ilości substancji można uważać za szóstą jednostkę podstawową układu SI, gdyż jest ona niezależna od jednostek pozostałych [1]. Zdefiniowanie normalnego kilograma za pośrednictwem wzorca jednostki masy nie podważa niezależności tej jednostki. Jednostka podstawowa układu MKpS 1 kp (kilopond) również jest zdefiniowana za pośrednictwem wzorca jednostki masy.

Zmiany poziomu energetycznego spotykane w technice cieplnej są stosunkowo niewielkie i w znikomym stopniu wpływają na masę substancji. Dlatego najczęściej nie odróżnia się jednostki masy 1 kg od jednostki ilości substancji 1 nkg. Brak tego rozróżnienia jednostek prowadzi jednak do nieścisłości pojęciowych. Konsekwentne stosowanie normalnego kilograma w charakterze jednostki podstawowej układu SI wyeliminowałoby na przykład niektóre niezupełnie logiczne wymiary (np. dotąd w układzie SI właściwa energia ma wymiar  $m^2/s^2$ , powinna zaś mieć wymiar  $kg\ m^2/nkg\ s^2$ ).

Jeżeli nie tylko nie rozróżnia się jednostek, lecz nawet nie uwzględniła się różnicy pojęć masy i ilości substancji dochodzi się do zasadniczych trudności logicznych, omówionych w następnym punkcie.

W układzie MKpS można by również zdefiniować jednostkę ilości substancji za pośrednictwem normalnej masy. Otrzymałoby się jednak jednostkę nie przyjętą w praktyce (1 normalny inert). Dlatego zaproponowano [3] by w układzie MKpS za jednostkową, przyjmując tę ilość substancji, której ciężar w spoczynku w próżni, w znormalizowanych warunkach energetycznych przy normalnym przyspieszeniu grawitacyjnym (tzw. ciężar normalny) wynosi 1 kp. Tak zdefiniowany normalny kilopond nkp jest oczywiście identyczny ze zdefiniowanym wyżej normalnym kilogramem.

Pojęcie ilości substancji odgrywa w technice cieplnej znacznie większą rolę niż pojęcie masy. Znajomość masy jest potrzebna tylko przy obliczaniu energii kinetycznej i potencjal-

<sup>x</sup>) Przez znormalizowane warunki energetyczne rozumie się ustalone umową normalne ciśnienia i normalną temperaturę. W niektórych wypadkach może być ponadto konieczne ustalenie umowej normalnej postaci fazowej.

nej ciał. Najczęściej interesuje nas liczba atomów lub drobin uczestniczących w przemianach termodynamicznych, tj. ilość substancji. Z tego też powodu wielkości właściwe podane w tablicach termodynamicznych i na wykresach są odniesione do jednostkowej ilości substancji. Wielkości, których wymiar nie zawiera w mianowniku jednostki ilości substancji nie powinny być nazywane wielkościami właściwymi.

## 2. Prawo zachowania ilości substancji

Przy badaniu procesów fizycznych i chemicznych stosuje się dwa podstawowe prawa fizyki, dla których często stosuje się nazwy: "prawo zachowania masy" i "prawo zachowania energii". Sporządza się więc dwa niezależne bilanse a mianowicie bilans energetyczny i tzw. bilans masowy. Jak wynika jednak z teorii względności, prawa zachowania masy i zachowania energii są równoważne, stanowią więc szczególne sformułowania jednego prawa ogólnego nazywanego prawem zachowania materii. Mimo tego wyjaśnienia nie ulega wątpliwości, że przy badaniu procesów fizycznych i chemicznych obok bilansu energetycznego można sporządzić drugi niezależny bilans. Nietrudno dojść do wniosku, że ten drugi bilans jest bilansem ilości substancji, wynika więc nie z prawa zachowania masy, lecz z prawa zachowania ilości substancji.

W procesach fizycznych i chemicznych prawo zachowania ilości substancji jest spełnione, gdyż nie ulega zmianie ani liczba ani rodzaj atomów uczestniczących w rozpatrywanych zjawiskach. W procesach jądrowych prawo zachowania ilości substancji nie jest spełnione.

Przytoczone tu rozważania można zilustrować na przykładzie kotła parowego działającego w sposób ustalony. Jeżeli kotła nie odmula się, to ilość drobin pary odprowadzonej z kotła jest równa ilości drobin wody zasilającej. Ścisłe rzecz biorąc masa produkowanej pary jest nieco większa od masy wody zasilającej, gdyż para charakteryzuje się wyższym poziomem energetycznym. Jeżeli więc znana jest ilość wody zasilającej, to do obliczenia ilości pary należy wykorzystać nie prawo zachowania masy, lecz prawo zachowania ilości substancji.

Bilans substancjalny układu wyodrębnionego za pomocą osłony bilansowej można ująć następującym równaniem:

$$G_d = \Delta G_u + G_w \quad (1)$$

gdzie:

- $G_d$  - ilość substancji doprowadzonej do układu,
- $G_w$  - ilość substancji wyprowadzonej z układu,
- $\Delta G_u$  - przyrost ilości substancji w układzie.

Prawo zachowania ilości substancji prowadzi zwykle do kilku niezależnych równań bilansowych. W procesach fizycznych równanie (1) można stosować oddzielnie do każdej substancji. W procesach chemicznych równanie to należy stosować oddzielnie do każdego z pierwiastków. Równanie (1) zastosowane w procesie chemicznym w sposób globalny, nie spełnia się ściśle, gdyż masa normalna związku chemicznego nie jest ściśle równa masie normalnej pierwiastków składowych.

Przy badaniu procesów fizycznych oraz przy sporządzaniu bilansu substancjalnego pierwiastków w procesie chemicznym w równaniu (1) można zastosować dowolne jednostki ilości substancji a więc nie tylko normalny kilogram, lecz także kilomol lub normalny metr sześcienny.

### 3. Masa właściwa, gęstość masy, gęstość substancji

Konsekwentne stosowanie pojęcia ilości substancji zmusza do wprowadzenia niektórych nowych określeń i zrewidowania niektórych nazw dotąd stosowanych.

Biorąc pod uwagę zależność masy substancji od jej poziomu energetycznego, należałoby wprowadzić pojęcie masy właściwej zdefiniowane jako stosunek ilości masy do ilości substancji:

$$Q_m = \frac{m}{G} = \frac{m_n}{G} \left( 1 + \frac{\Delta E}{m_n c^2} \right) \quad (2)$$

gdzie:

$m$  - masa substancji, kg,

$G$  - ilość substancji, nkg,

$m_n$  - masa normalna, kg<sup>x)</sup>

$\Delta E$  - przyrost energii substancji w stosunku do wartości występującej w spoczynku, w znormalizowanych warunkach energetycznych, kg m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>,

$c$  - prędkość światła w próżni, m/s.

x) Należy tu podkreślić, że masa normalna  $m_n$  jest w zasadzie różna od masy spoczynkowej  $m_0$ . Przy wyznaczeniu bowiem masy normalnej obok założenia zerowej wartości energii kinetycznej przyjmuje się dodatkowo założenie znormalizowanego stanu energetycznego. Chcąc więc od równania (2) podstawić znany wzór na zależność masy od prędkości w ciała

$$m = m_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{w^2}{c^2}}}$$

należałoby dodatkowo uwzględnić zależność między masą normalną i masą spoczynkową.

Stosunek  $m_n/G$  ma oczywiście w układzie SI wartość liczbowa 1 i wymiar  $\text{kg}/\text{nkg}$ . W układzie MKpS stosunek ten miałby wartość 0,101972  $\text{inert}/\text{nkg}$ . Bezwymiarowy człon korekcyjny w nawiasie wzoru (2) ma na ogół wartość bliską jedności.

Analogicznie do pojęcia masy właściwej można by wprowadzić pojęcie ciężaru właściwego definiując tę wielkość jako stosunek ciężaru substancji do ilości substancji:

$$\rho_c = \frac{C}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho_m g \quad (3)$$

gdzie:

C - ciężar ciała,  $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$

g - przyspieszenie grawitacyjne,  $\text{m}/\text{s}^2$ .

Określenie "ciężar właściwy" stosowane dotąd dla stosunku ciężaru do objętości jest oczywiście nieodpowiednie. Wszystkie wielkości odniesione do jednostki objętości powinny mieć nazwę gęstość. Należałoby więc odróżnić różne rodzaje gęstości, a w szczególności gęstość substancji, gęstość masy i gęstość ciężaru. Gęstość substancji  $\gamma_G$  ma największe znaczenie w technice cieplnej, określa stosunek ilości substancji do objętości V ciała i ma w układzie SI wymiar  $\text{nkg}/\text{m}^3$

$$\gamma_G = \frac{G}{V} \quad (4)$$

Gęstość masy  $\gamma_m$  określa stosunek masy do objętości i ma w układzie SI wymiar  $\text{kg}/\text{m}^3$

$$\gamma_m = \frac{m}{V} = \rho_m \gamma_G \quad (5)$$

Gęstość ciężaru wyraża stosunek ciężaru do objętości i ma w układzie SI wymiar  $\text{kg}/\text{s}^2 \cdot \text{m}^2$

$$\rho_c = \frac{C}{V} = \rho_c \gamma_G = g \rho_m \gamma_G \quad (6)$$

W podobny sposób można otworzyć inne pojęcia gęstości jak np. gęstość energii lub gęstość egzergii.

#### 4. Uwagi końcowe

Ścisłe odróżnianie pojęcia ilości substancji od pojęcia masy jest zdaniem autora konieczne, gdyż stanowi ono podstawę sto -

sowania prawa zachowania ilości substancji. Prawo to w przeciwieństwie do prawa zachowania masy jest niezależne od prawa zachowania energii.

Ścisłe odróżnianie jednostek ilości substancji od jednostek masy komplikuje nieco ujęcie niektórych równań termodynamiki i na pewno nie będzie chętnie przyjęte przez praktyków, tym bardziej że brak tego odróżnienia nie prowadzi na ogół do zauważalnych błędów obliczeniowych.

Wydaje się jednak, że stosowanie coraz ściślejzych pojęć przez usunięcie niekonsekwencji logicznych ułatwia zrozumienie analizowanych zagadnień. Wynikająca stąd komplikacja jest najczęściej tylko pozorna, jest bowiem odbiciem panujących przyzwyczajęń.

#### LITERATURA

- [1] Górniak H., Gundlach W., Ochęduszek St.: Zastosowanie międzynarodowego układu jednostek miar w energetyce cieplnej, Warszawa - Wrocław 1965.
- [2] Schmidt E.: Einführung in die technische Thermodynamik, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1960.
- [3] Wiśniowski W.: Rozważania termodynamiczne, Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej Nr 9, Mechanika z. 1, Wrocław 1955.

Praca wpłynęła do Redakcji w dniu 19 stycznia 1966 r.

## ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

## Р е з ю м е

Законы сохранения массы и сохранения энергии взаимно зависимы и представляют собой только отдельные формулировки одного общего закона: закона сохранения материи. При исследовании физических и химических процессов, кроме закона сохранения энергии мы используем второй, независимый закон: закон сохранения количества вещества. В физических и химических процессах этот закон соблюдается, так как количество молекул или атомов не меняется. Масса молекул или атомов зависима от их энергетического уровня, и поэтому не остается постоянной.

Количество вещества определяют при помощи т.н. нормальной массы [3]. Соблюдая различие единицы массы и единицы количества вещества, необходимо ввести новые понятия, такие как: удельная масса, плотность вещества, плотность массы, плотность веса.

## LAW OF THE CONSERVATION OF SUBSTANCE QUANTITY

## S u m m a r y

The law of the conservation of mass and the law of the conservation of energy depend mutually and are only the particular forms of one general law i.e. law of the conservation of matter.

Examining the physical and chemical processes except the law of the conservation of energy we are using the second independent law i.e. the law of the conservation of substance quantity. That law in physical and chemical processes is fulfilled, because in these processes the quantity of the molecules or the atoms is not varying. The mass of the molecules or the atoms is varying because it depends on the energy level.

Quantity of substance one determines by means of so called the normal mass [3]. Taking to the account the difference in mass units and the units of the quantity of substance one should introduce the new conceptions like specific mass, density of substance, density of mass and density of weight.