

Ryszard Petela
Instytut Techniki Ciepłej

ZAGADNIENIE WYPROWADZANIA WZORU
NA EGZERGIE PROMIENIOWANIA CIEPŁEGO

Streszczenie. Na tle istniejących dotąd sposobów wyprowadzania wzorów na egzergię promieniowania przedstawiono sposób nowy i krótszy, oparty na podstawowym wzorze (2) definiującym egzergię, wynikającym z rozważań nad egzergią substancji. Nowy sposób zastosowano do egzergii emisji własnej i dowolnego promieniowania ciepłego. Zakończono wnioskami.

1. Emisja własna

Za najprostszы przypadek promieniowania można przyjąć emisję własną powierzchni doskonale szarej. Przyjmuje się, że rozważana powierzchnia o temperaturze T jest izotermiczna i jednorodna pod względem własności promienistych (jednorodna wartość emisyjności ϵ powierzchni). Egzergię \dot{b}_e gęstości emisji własnej takiej powierzchni określa się wzorem

$$\dot{b}_e = \epsilon \frac{ac}{12} (3 T^4 - T_{ot}^4 - 4 T^3 T_{ot}) \quad (1)$$

gdzie

- a - uniwersalna stała,
- c - prędkość rozprzestrzeniania się promieniowania w próżni,
- T_{ot} - temperatura otoczenia.

Wzór (1) wyprowadzono po raz pierwszy za pomocą egzergetycznego bilansu promieniujących powierzchni [1]. Dla powierzchni doskonale czarnej ($\epsilon = 1$) wzór (1) wyprowadzono również obliczając użyteczną pracę wykonaną przez promieniowanie (gaz fotonowy) rozprężające się adiabatycznie w cylindrze z tłokiem [2], [3].

Promieniowanie ciepłe jest rodzajem materii polowej i przy wyprowadzaniu wzoru na egzergię w obu powyższych przypadkach nie oparto się na wynikającym z definicji egzergii ogólnym wzorze podstawowym, stosowanym dotąd tylko dla substancji (materii substancjalnej). Wynikało to stąd, że interpretacja wielkości występujących w tym wzorze, jednoznaczna dla substancji, była niezbyt oczywista dla promieniowania.

Obecnie, gdy znana jest już ostateczna postać wzoru (1), określona z całą pewnością, aczkolwiek dość długą drogą, można w pracy niniejszej przedstawić nowy sposób wyprowadzenia wzoru na egzergię gęstości emisji własnej opierający się na definicyjnym wzorze dla termicznej egzergii właściwej b_t strugi materii [4]

$$b_t = i - i_{ot} - T_{ot}(s - s_{ot}) \quad (2)$$

gdzie

i, s - właściwa energia (entalpia) i właściwa entropia rozważanej strugi materii,

i_{ot}, s_{ot} - właściwa energia (entalpia) i właściwa entropia tej strugi będącej w stanie termodynamicznej równowagi z otoczeniem.

Za właściwą energię i strugi materii można by w przypadku promieniowania przyjąć gęstość energii \dot{e} emitowanej ($i = \dot{e}$) przez rozważaną powierzchnię doskonale szarą o dowolnej temperaturze T i dowolnej emisyjności $\dot{\epsilon}$. Wielkość \dot{e} oblicza się na podstawie prawa Stefana-Boltzmann'a

$$\dot{e} = \dot{\epsilon} \frac{\pi c}{4} T^4 \quad (3)$$

Emisja własna rozważanej powierzchni będzie w termodynamicznej równowadze z otoczeniem w przypadku, gdy temperatura tej powierzchni będzie równa T_{ot} . Wówczas gęstość \dot{e}_{ot} emisji własnej, ($\dot{e}_{ot} = i_{ot}$), określa się wzorem

$$\dot{e}_{ot} = \dot{\epsilon} \frac{\pi c}{4} T_{ot}^4 \quad (4)$$

Za właściwą entropię s występującą we wzorze (2) można by przyjąć entropię \dot{s} gęstości emisji własnej powierzchni doskonale szarej ($s = \dot{s}$, $s_{ot} = \dot{s}_{ot}$), którą określa się wzorem [5]

$$\dot{s} = \dot{\epsilon} \frac{\pi^2 ac}{3} T^3 \quad (5)$$

przy czym

$$\dot{s}_{ot} = \dot{\epsilon} \frac{\pi^2 ac}{3} T_{ot}^3 \quad (6)$$

Uwzględniając zależności od (3) do (6) w (2) otrzymuje się wzór (1).

2. Dowolne promieniowanie ciepłe

Wyprowadzenie wzoru na egzergię dowolnego promieniowania ciepłego można również oprzeć na wzorze (2). Należy tylko znów odpowiednio zinterpretować wielkości występujące w tym wzorze. Egzergię ciepłego promieniowania dowolnego, a więc spolaryzowanego, o dowolnym rozkładzie (widmie) energii podług częstości drgań ν i rozprzestrzeniającego się w obrębie dowolnego kąta bryłowego określonego kątem ν' (azymut) i kątem φ (deklinacja), oblicza się za pomocą gęstości jasności promieniowania [5]

$$\dot{h} = \iiint_{\nu' \varphi \nu} (K_{\nu'} + K'_{\nu'}) d^2C d\nu \quad (7)$$

gdzie

$K_{\nu'}$, $K'_{\nu'}$ - najmniejsza i największa wartość składowej monochromatycznej jasności kierunkowej promieniowania, zależnej od częstości drgań.

Dla skrócenia zapisu oznaczono

$$d^2C = \cos \nu' \sin \nu' d\nu' d\varphi \quad (8)$$

Wzór (7) może służyć do określenia wielkości i występującej we wzorze (2) przy interpretacji $i = \dot{h}$.

Dla określenia wielkości $i_{ot} = \dot{h}_{ot}$ należy wykorzystać odpowiednio wzór (7). Tym razem ma on wyrażać gęstość jasności promieniowania będącego w termodynamicznej równowadze z otoczeniem, a więc energię promieniowania czarnego o temperaturze T_{ot} rozprzestrzeniającego się w obrębie tego samego kąta bryłowego, a więc

$$\dot{h}_{ot} = \frac{90}{4} T_{ot}^4 \frac{1}{\pi} \iiint_{\nu' \varphi} d^2C \quad (9)$$

Entropię j gęstości jasności dowolnego promieniowania ciepłego oblicza się wzorem [5]

$$\dot{j} = \iiint_{\nu' \varphi \nu} (L_{\nu'} + L'_{\nu'}) d^2C d\nu \quad (10)$$

gdzie

$L_{\nu'}$, $L'_{\nu'}$ - entropia najmniejszej i największej wartości składowej monochromatycznej jasności kierunkowej promieniowania, zależnej od częstości drgań.

We wzorze (2) można wzór (10) wykorzystać przez podstawienie $s = \dot{j}$. Entropię \dot{j}_{ot} gęstości jasności promieniowania będącego w termodynamicznej równowadze z otoczeniem oblicza się analogicznie do wzoru (9)

$$\dot{j}_{ot} = \frac{ac}{3} T_{ot}^3 \frac{1}{\pi} \iint_{\nu\phi} d^2C \quad (11)$$

We wzorze (2) uwzględnia się więc $s_{ot} = \dot{j}_{ot}$.

Uwzględniając zależności (7), (9), (10) i (11) w (2) otrzymuje się wzór na egzergię \dot{b}_h gęstości jasności dowolnego promieniowania ciepłego

$$\begin{aligned} \dot{b}_h = & \frac{ac}{12} T_{ot}^4 \frac{1}{\pi} \iint_{\nu\phi} d^2C + \iiint_{\nu\phi\gamma} (K_\gamma + K'_\gamma) d^2C d\gamma \\ & - T_{ot} \iiint_{\nu\phi\gamma} (L_\gamma + L'_\gamma) d^2C d\gamma \end{aligned} \quad (12)$$

Wzór (12) został wyprowadzony już dawniej [5] przez bilansowanie egzergiczne elementu pewnej powierzchni. Z wzoru tego już bezpośrednio wynikają poszczególne jego odmiany dla rozmaitych przypadków promieniowania.

3. Wnioski

Wykazano więc, że wzory na egzergię promieniowania można wyprowadzić krótkim stosunkowo sposobem w oparciu o ogólny wzór definiujący egzergię substancji. Przedstawiony tu sposób na tle dotąd znanych ma już teraz raczej znaczenie głównie dydaktyczne. Poucza on o możliwości ogólnej interpretacji wielkości występujących we wzorze (2) i mogącej być wykorzystywanej dla różnych rodzajów materii. Przedstawione rozważania wskazują na pewną analogię pomiędzy wielkościami takimi jak z jednej strony właściwa energia substancji (odniesiona do jednostki ilości tej substancji) i z drugiej strony - gęstość emisji własnej względnie gęstość jasności promieniowania (odniesione do jednostki powierzchni).

Na podstawie wzoru (2) oraz przy odpowiedniej interpretacji wzorów do obliczania jasności dowolnego promieniowania i jej entropii można w razie potrzeby wyznaczać również egzergię monochromatycznej intensywności promieniowania dla określonej wartości częstotliwości drgań.

LITERATURA

1. PETELA R.: Eksergia emisji własnej ciała doskonale szarego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 5, 1961, s. 33-45.
2. PETELA R.: Exergy of Heat Radiation. Journal of Heat Transfer, Transactions of ASME, Vol. 86, Series C, nr 2, maj 1964, s. 187-192.
3. PETELA R.: Egzergia promieniowania cieplnego. Energetyka Przemysłowa X, 1962, z. 11, s. 399-403.
4. SZARGUT J.: Bilans potencjonalny procesów fizycznych wynikający z drugiej zasady termodynamiki. Archiwum Budowy Maszyn, 3, 1956, nr 3, s. 231-276.
5. PETELA R.: Eksergia jasności promieniowania. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 9, 1962, s. 43-70.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1973 roku.

ПРОБЛЕМА ВЫВОДА ФОРМУЛЫ НА ЭКСЕРГИЮ ТЕПЛОВОЙ РАДИАЦИИ

Р е з ю м е

На основании существующих до настоящего времени способов вывода формул на эксергию радиации представлен новый способ и короче, основанный на основной формуле (2), определяющей эксергию, следующую из рассуждений по эксергии вещества. Новый способ был применен для эксергии собственного излучения и произвольной тепловой радиации. Работа окончена выводами.

THE PROBLEM OF DERIVATION OF THE FORMULA FOR HEAT RADIATION EXERGY

S u m m a r y

In comparison with procedures so far existing for derivation of formulae for the exergy of heat radiation, there has been presented in this paper the new and simpler procedure. It is based on the fundamental formula (2) which defines the exergy and which results from the consideration on an exergy of substance. The new procedure is here applied to the exergy of own emission of perfectly gray surface and to the arbitrary heat radiation. The paper draws conclusions from these considerations.