

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТЕЛА

**Уваров Вячеслав Михайлович**

доктор наук, профессор

Петербургский государственный университет путей сообщения

**Громова Екатерина Сергеевна**

кандидат наук, доцент

Петербургский государственный университет путей сообщения

**Хохлов Григорий Григорьевич**

кандидат наук, доцент

Петербургский государственный университет путей сообщения

## TO DETERMINING THE BODY BLACKNESS

**Uvarov Vyacheslav**

Doctor of Science, professor

St. Petersburg State Transport University

**Gromova Yekaterina**

Candidate of Science, assistant professor

St. Petersburg State Transport University

**Khokhlov Grigoriy**

Candidate of Science, assistant professor

St. Petersburg State Transport University

### Аннотация

Предложен способ определения степени черноты материала на основе данных измерений уменьшения температуры тела в вакууме.

### Annotation

A method, based on measurement data of a decrease in body temperature in a vacuum, proposed for determining the degree of blackness of a material.

**Ключевые слова:** степень черноты; регулярный режим охлаждения; темп охлаждения.

**Keywords:** degree of blackness; regular cooling mode; cooling rate.

Как известно [1,2] энергетическая светимость  $R$  (или поверхностная плотность потока интегрального излучения) абсолютно черного тела в зависимости от температуры  $T$  описывается законом Стефана – Больцмана:

$$R = \sigma_0 \cdot T^4, \quad (1)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  постоянная Стефана – Больцмана.

Реальные тела излучают меньше тепловой энергии, чем абсолютно черное тело при той же температуре. Одной из характеристик таких тел является степень черноты  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = R/R_0 \quad (2)$$

значения которой лежат в интервале от 0 до 1 в зависимости от материала и состояния поверхности. С учетом (2) закон Стефана – Больцмана для реальных тел можно записать в виде:

$$R = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad (3).$$

Проблема определения степени черноты рассматривалась в ряде статей и монографий. Как отмечалось в [3] методы теоретического расчета степени черноты не разработаны, а для опытного

определения предложено несколько методов: радиационный, калориметрический и метод регулярного теплового режима. Недостатком первых двух является необходимость измерения лучистых тепловых потоков. Поэтому в [3] использовался метод регулярного теплового режима, в котором нет необходимости измерять лучистые тепловые потоки.

В монографии [4], посвященной регулярному тепловому режиму, это понятие вводится следующим образом.

Рассмотренный Ньютоном простейший случай теплоотдачи тела во внешнюю среду описывается уравнением

$$\frac{dT}{dt} + n(T - T_{cp}) = 0 \quad (4)$$

где  $T$  – температура тела,  $T_{cp}$  – температура окружающей среды,  $t$  – время,

$$n = \frac{\alpha \cdot S}{C} \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $S$  – поверхность тела,  $C$  – его полная теплоемкость.

Решение (4) имеет вид:

$$(T - T_{cp}) = H \cdot e^{-n \cdot t}, \quad (6)$$

где  $H$  – произвольная постоянная.

Этот элементарный случай нашел важное практическое применение в тепловых измерениях и исследованиях, как подчеркивается в [4].

В случае тела неправильной или сложной формы вместо решения (6) в [4] приводится решение, данное Буссинеском ещё в 1900 г.:

$$(T - T_{cp}) = A_0 \cdot U_0 \cdot e^{-n_0 t} + A_1 \cdot U_1 \cdot e^{-n_1 t} + \dots, \quad (7)$$

где числа  $n_0, n_1, \dots$  представляют собой ряд всегда возрастающих дискретных положительных чисел  $n_0 < n_1 < n_2 < \dots$ , а  $U_0, U_1, \dots$  – собственные функции, зависящие от координат. С течением времени  $t$  все члены ряда (7) становятся пренебрежимо малыми по сравнению с первым членом и (7) переходит в аналогичное (6) выражение:

$$T - T_{cp} = A \cdot U_0 \cdot e^{-n_0 t} \quad (8)$$

Как только наступает тепловой режим, характеризуемый простым аналитическим выражением (8), говорят, что наступил регулярный, т.е. упорядоченный, режим охлаждения.

Из (8) следует, что

$$n_0 = \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

Параметр  $n_0$  называют темпом охлаждения [4].

Наряду с упомянутыми тремя методами для опытного определения степени черноты можно использовать также следующий метод. Как и используемый в [3] регулярный тепловой режим он не требует измерения лучистых тепловых потоков. Однако в данном случае процесс охлаждения тела определяется не теплоотдачей в окружающую среду, а излучением с поверхности тела тепловых электромагнитных волн в вакуум.

Энергетический баланс в этом случае, очевидно, описывается уравнением

$$c \cdot m \cdot dT = -\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \cdot S \cdot dt \quad (10)$$

где  $m$  – масса тела,  $S$  – площадь его поверхности,  $c$  – удельная теплоемкость тела.

Интегрирование уравнения (10) с начальным условием

$$T_{t=0} = T_0 \quad (11)$$

приводит к соотношению:

$$\frac{1}{T^3} - \frac{1}{T_0^3} = \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \cdot S}{c \cdot m} \cdot t \quad (12)$$

из которого следует зависимость температуры от времени:

$$T(t) = \left( \frac{1}{T_0^3} + \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S}{c \cdot m} \cdot t \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Из сравнения (13) и (8) видно, что в рассматриваемом случае охлаждение тела идет существенно иначе, чем в случае так называемого регулярного теплового режима.

При выводе соотношений (12) и (13) предполагалось постоянство параметров  $c$  и  $\varepsilon$ . Строго говоря, такое предположение не вполне согласуется с данными измерений. Например, удельная теплоемкость стали увеличивается на 11%, а титана на 6% при изменении температуры от 50 °С до 600 °С [3]. Степень черноты изменяется от 0,45 до 0,805 для стали и от 0,5 до 0,805 для титана в тех же температурных пределах [3].

В этой связи следует отметить, что соотношения (12), (13) носят лишь приближенный характер. По этой причине использование соотношений (12), (13) для определения степени черноты на основе данных измерений хода температуры  $T(t)$  может привести к заметным отклонениям от истинных значений.

Указанного ограничения можно избежать, если для расчета по данным измерений температурного хода  $T(t)$  изначально использовать уравнение (10), из которого вытекает следующее выражение для  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = -\frac{c \cdot m}{\sigma_0 \cdot S \cdot T^4} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (14)$$

Очевидно, что при определении степени черноты  $\varepsilon$  на основе уравнения (14) перечисленные ранее ограничения не играют никакой роли. Точность определения  $\varepsilon$  на основе соотношения (14) определяется исключительно точностью измерений хода понижения температуры  $T$  с течением времени  $t$ , данными по удельной теплоемкости  $c$  и, не в последнюю очередь, аккуратным расчетом производной  $\frac{dT}{dt}$ . Последнее зависит, образно говоря, от качества графика  $T(t)$ . В одном случае целесообразно аппроксимировать экспериментальный набор значений  $\{T_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  аналитическим выражением, используя метод наименьших квадратов, для последующего аналитического расчета производной. В другом случае может понадобиться сглаживание сплайнами. Наконец, в случае, когда по набору экспериментальных данных  $\{T_i\}$  кривая графика вырисовывается идеально вполне возможен расчет производной методом конечных разностей:

#### Литература:

1. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. - М.- Наука. 1971.
2. Теплотехника. Учебное пособие для вузов. Под ред. А.П.Баскакова. -М.- Энергоатомиздат. 1991. 224 с.
3. Осипова В. А. Определение степени черноты металлов методом регулярного теплового режима // Теплоэнергетика. – 1958 - №4. - с. 59 – 63.
4. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. - М. Государственное издательство технико-теоретической литературы. - 1954. - 408 с.