

УДК 699.887.3; 546.296

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ С УЧЕТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ**

д.т.н., проф А.С. Беликов\*, к.т.н., доц. В.А. Шаломов\*

к.т.н. С.Ю. Рагимов\*\*, директор компании Вильгельм Шок\*\*\*

\*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,

\*\*Национальный университет гражданской защиты Украины,

\*\*\* «Ост-Вест», г. Киссинг, Германия

**Актуальность.** Необходимое условие нормальной жизнедеятельности человека – это обеспечение нормальных метеорологических условий в помещениях, которые оказывают существенное влияние на тепловое самочувствие работника. Микроклимат зависит от теплофизических особенностей технологического процесса, климата, сезона года, условий отопления и вентиляции. Источниками инфракрасного излучения является значительная часть производственных процессов, поверхности оборудования и т.д.

**Основная часть.** Исследования показали [1, 2], что не менее 60% всей тепловых потерь энергетических установок распространяется путем инфракрасного излучения. Потоки теплового излучения рабочего пространства характеризуются энергетической освещенностью, которая зависит от расстояния до теплового источника.

Рядом авторов [1-3] для определения интенсивности излучения какого либо тела  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>, от нагретой поверхности через технологическое отверстие в оборудовании предложено использовать следующие зависимости:

$$\text{При } r \geq F \quad E = \frac{0,91^F \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{дон}}{100} \right)^4 \right]}{r^2} \quad (1)$$

$$\text{При } r \leq F \quad E = \frac{0,91 \sqrt{F \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{дон}}{100} \right)^4 \right]}}{r^2} \quad (2)$$

где  $F$  – площадь излучаемой поверхности, м<sup>2</sup>;  $T$  – температура излучаемой поверхности, К;  $T_{дон}$  – допустимая температура на облучаемой поверхности, К;  $r$  – расстояние до источника излучения, м.

При этом для исследования энергии теплового излучения используют актинометры, радиометры и инфракрасные фильтры для выделения участков спектра (ИКС - 10, ИКС - 12, ИКС - 14).

Как показала практика, предложенная методика исследований имеет ряд недостатков, а главное высокая погрешность определения терморadiационной напряженности на рабочих местах.

При условии, что  $E_0 = \max$  и  $\cos\alpha = 1$ , а облученность практически не изменяется для формы поверхности источника излучения близкой к квадрату, получим:

$$E_0 = \frac{4L_a}{\sqrt{4l^2 + a^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{4l^2 + a^2}} \quad (3)$$

где  $a$  - сторона площадки источника излучения, м;  $l$  - расстояние от центра излучающей поверхности до облучаемой точки, м;  $L_a$  - яркость излучаемого источника.

Определение значения  $E_0$ ,  $a$  и  $L$  на практике часто связано со значительными трудностями, особенно на расстоянии  $\leq 1$  м, в виду специфики работы тепловых агрегатов, что отмечалось ранее.

Характер изменения интенсивности теплового излучения источников от расстояния до рабочего места подчиняется квадратичной зависимости. Рассмотрим эти зависимости в плане математического моделирования, что по нашему мнению позволит расширить энергетические диапазоны исследования и получить результаты с большим квантованием по расстоянию и по пределам интенсивности теплового излучения. Рассмотрим процесс излучения энергии от объекта к поглощаемой площадке облучаемого объекта. Телесный угол измеряется площадью, определяемой телесным углом по сфере единичного радиуса с центром и вершиной (рис.1).

При этом с увеличением угла зрения, определяемого отношением сторон с линейными размерами  $a$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $R$ , телесный угол сохраняется, даже при бесконечном уменьшении элементарных площадок излучаемой поверхности.

Принимаем в телесном угле за основу при расчете  $R$ :

$$R = \sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}} \quad (4)$$

где  $a$  - сторона (диаметр площадки);  $b = 1/2a$ ;  $h$  - расстояние от источника до центра площадки;  $R$  - длина образующей угла.

Если примем  $R=1$ , то линейные размеры изменяются при том же телесном угле, тогда получим:

$$b = \frac{\frac{a}{2}}{\sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}} = \frac{a}{\sqrt{4h^2 + a^2}} \quad (5)$$

Если примем  $\frac{a}{2} / b = \frac{R}{1}$ ;  $b = \frac{a}{2} / R$ ;

То все размеры элементарной единичной сферы вписываются в уравнение единичной сферы.

$$S = \iint \sqrt{1 + \left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2} dx dy \quad (6)$$

где  $f = z = \sqrt{1 + x^2 + y^2}$  - уравнение единой части сферы.

Размещение осей (рис.2.) на элементарной площадке и координат представляет полярную область, в которую проектируется кусок сферы.

Переходя к полярным координатам элементарной площадки после ее интегрирования и проводя соответствующее преобразование мы получим следующее выражение

$$s = 8 \int_0^{\frac{\pi}{4}} d\phi \int_0^{b/\cos\phi} \frac{\rho d\rho}{\sqrt{1-\rho^2}} = -8 \int_0^{\pi/4} \sqrt{1-\rho^2}$$

$$d\phi = -8 \int_0^{\pi/4} \sqrt{\cos^2\phi - b^2} \frac{d\rho}{\cos\phi} + 2\pi \quad (7)$$

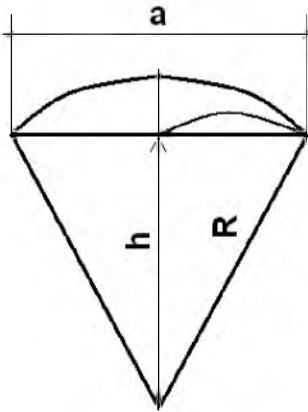


Рис.1. Схема расчета энергетической освещенности элементарной площадки

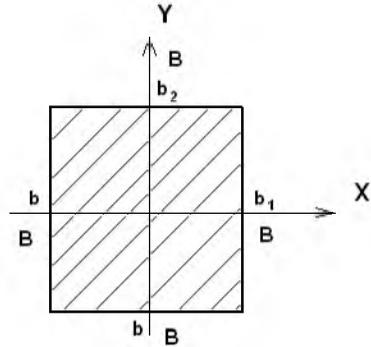


Рис.2. Полярные коэффициенты элементарной площадки

Преобразовав формулы определения  $E_0$  можно записать в следующем виде:

$$E_0 = 4ha * (4h^2 + a^2)^{-1} * \operatorname{arctg}(a * (4h^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}) \quad (8)$$

где  $a$  — сторона квадрата, м;  $h$  — расстояние от центра излучающей поверхности до освещаемой (облучаемой точки), м.

Согласно предварительным условиям постановки задачи, мы знаем расстояние до источника излучения  $h$ : энергетическая освещенность (облученность)  $E_0$  и размер источника  $a$ . Исходя из положения взаимосвязи тепловых величин яркость источника  $L$  может быть определена из данного выражения, а значение  $4L$ , представим как какую-то безотносительную величину  $A$  и зададим ее, как характеристику источника в широких границах заданного предела существования.

В отличие от работ [2-4] нами учитывались различные формы источников, а также суммарное воздействие теплового излучения от нескольких источников.

Источники могут быть прямоугольными, вытяженными с соотношением сторон 1:4 и более. Также часто отверстия (окна) печей могут быть круглыми, овальными и квадратными. Исходные формулы в таких случаях отличаются.

Рассмотрим основополагающие формулы излучающего тела. Также рассмотрим пример суммарного облучения от нескольких источников (принимая 2), хотя возможно и большее количество источников.

Если же источник будет прямоугольником то формулы несколько изменятся. Освещенность точки, находящейся на расстоянии  $h$  от одной из вершин светящегося прямоугольника:

$$E = \frac{L}{2} \left( \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{h^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{h^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \right) \quad (9)$$

где  $a, b$  — размеры прямоугольника.

Если имеем квадрат, то получим следующую зависимость:

$$E = 4L \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \quad (10)$$

Если круглый диск, то

$$E = \frac{\pi L a^2}{h^2 + a^2} \quad (11)$$

Освещенность от круглого диска радиуса  $a$  на диске радиуса  $a'$ ,  $E_{1-2}$  находящегося на расстоянии  $h$ :

$$E_{1-2} = \frac{\pi^2 L}{2} \left[ (h^2 + a^2 + a'^2) - \sqrt{(h^2 + a^2 + a'^2)^2 - 4a^2 a'^2} \right] \quad (12)$$

Эта формула следует из общей формулы

$$E_{1-2} = \iint_{AA'} \frac{L \cos \theta' \cos \theta}{l^2} dA dA' \quad (13)$$

Данная общая зависимость это левая часть интегрального уравнения полученного при рассмотрении обратной задачи радиационного излучения, состоящей в отыскании температурного распределения на поверхности по известному полю полусферической плотности падающего излучения на них. Из закона сохранения энергии получено интегральное уравнение первого рода.

Рассмотрим общее положение системы источника излучения и облучаемого объекта.

Пусть имеется некоторая произвольная замкнутая система серых диффузно излучающих тел, разделенных прозрачной средой (рис.3-4). Одна из постановок обратной задачи в этом случае заключается в отыскании температурного распределения на поверхностях тел  $T(M)$  по известному полю полусферической плотности падающего излучения  $E_{\Pi}(M)$  на них. На основании закона сохранения энергии эта задача в стационарном случае сводится к решению интегрального уравнения первого рода

$$\int_F E_{\varphi\phi}(N) \frac{\cos \theta_M \cos \theta_N}{\pi r_{MN}^2} dF_N = E_{\Pi}(M) \quad (14)$$

относительно полусферической плотности эффективного излучения  $E_{\varphi\phi}$  с последующим расчетом поля температуры  $T(M)$  по формуле

$$T(M) = \left\{ \frac{1}{\varepsilon\sigma} \left[ E_{\varphi\phi} - 1(1-A)E_{\Pi} \right] \right\}^{1/4} \quad (15)$$

Здесь под падающим излучением  $E_{\Pi}$  понимается сумма поглощенного и отраженного поверхностью излучений. Эффективное излучение, исходящее с поверхности серого тела, представляет собой сумму собственного и отраженного излучений. Задачи подобного типа возникают при определении режимов работы радиационных нагревательных устройств в экспериментальных стендах и различных технологических процессах. Сформулированные обратные задачи радиационного теплообмена это стационарные и линейные задачи, в которых лучеобменивающиеся тела считаются непрозрачными.

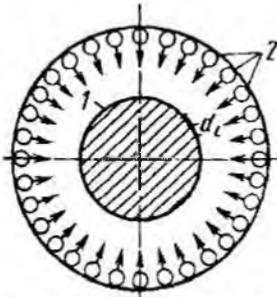


Рис.3. Инфракрасный имитатор:  
1 - испытываемый образец; 2 - излучатели.

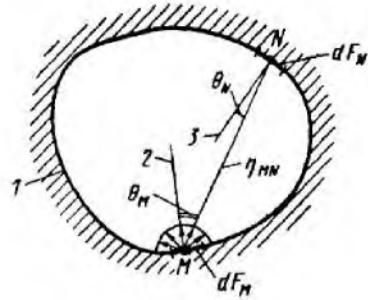


Рис.4. Замкнутая система тел: 1 – диффузно излучающая поверхность F; 2, 3 – нормали к поверхностям в точках M и N соответственно.

После преобразований зависимости (14) получим зависимость:

$$E_{\text{эф}}(M) = \iint_F E_{\text{эф}}(N) \frac{\cos \theta_M \cos \theta_N}{\pi r_{MN}^2} dF_N \quad (16)$$

Рассмотрим систему дискретно излучающих источников (для примера два источника) с одинаковой интенсивностью излучения. Допустим, также есть два облучаемых объекта. Тогда на основе зонального метода составления уравнения теплового баланса, характеризующего равенство тепловых потоков, воспринимаемых каждым элементом в условиях облученности и заданных тепловых потоков  $q_1, q_2$  (рис.5).

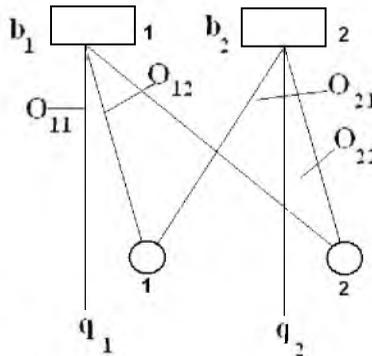


Рис.5. Система дискретно излучающих источников.

Приходим к системе линейных уравнений

$$\begin{cases} J_1 A_{11} \cos \theta_{11} + J_2 A_{12} \cos \theta_{12} = \frac{1}{\pi} q_1 \\ J_1 A_{21} \cos \theta_{11} + J_2 A_{21} \cos \theta_{21} = \frac{1}{\pi} q_2 \end{cases} \quad (17)$$

$A_{ij}$  - поглощательная способность  $i$ -того элемента по отношению к  $j$ -тому излучателю;  $\theta_{ij}$  - угол направления от  $j$ -того излучателя на  $i$ -тый облучаемый элемент;  $J_k$  - искомая интенсивность  $K$  излучателя.

Эта задача решается достаточно просто так как является линейной системой уравнений

Так в случае двух источников излучения и двух объектов облучения имеем

$$J_1 = \frac{1}{\pi} \frac{q_2 A_{11} \cos \theta_{11} - q_1 A_{21} \cos \theta_{21}}{A_{11} A_{22} \cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - A_{12} A_{21} \cos \theta_{12} \cos \theta_{21}} \quad (18)$$

$$J_2 = \frac{1}{\pi} \frac{q_1 A_{22} \cos \theta_{22} - q_2 A_{12} \cos \theta_{12}}{A_{11} A_{22} \cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - A_{12} A_{21} \cos \theta_{12} \cos \theta_{21}} \quad (19)$$

Общая система уравнений для  $n$  облучаемых элементов и  $m$  облучателей примет вид:

$$\pi \sum_{j=1}^m J_j A_{ij} \cos \theta_{ij} = q_i, \quad i = 1, n \quad (20)$$

**Заключение.** Расчет интенсивности теплового облучения на рабочем месте трудоемок и, поэтому на практике удобнее пользоваться номограммой, которую, можно построить на основании результатов светового моделирования.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Аметистов Е. В. Основы теории теплообмена. М.: МЭИ, 2000.- 242 с.
2. Мищенко С. В., Чуриков А. А., Подольский В. Е. Метод неразрушающего контроля при исследовании температурной зависимости теплофизических характеристик массивных образцов // Вестник ПГТУ, 1995. т.1. №3-4.- С.246-254.
3. Рагимов С. Ю. Обеспечение безопасности жизнедеятельности на рабочих местах с повышенным тепловым излучением: Дис... канд. техн. наук / ГВУЗ «ПГАСА». - Днепропетровск, 2012. - 253с.
4. Сафонов В.В., Стрежекуров Э.Е. Методика обследования условий труда на рабочих местах с избыточным тепловым излучением // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. – Дніпропетровськ, – 2001.- Вип.13.- С.96.