

УДК 699.887.3; 546.296

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ С УЧЕТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Беликов А. С.\* д.т.н., проф., Шаломов В. А.\* к.т.н., доц.,  
Широкова Е. А.\* соиск., Рагимов С. Ю.\*\* к.т.н.

\* - ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» г. Днепрпетровск, Украина

\*\* - Национальный университет гражданской защиты Украины г. Харьков, Украина

**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. Поток теплового излучения рабочего пространства характеризуется 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:

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

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 проведя соответствующее преобразование мы получим следующее выражение

$$s = 8 \int_0^{\frac{\pi}{4}} d\phi \int_0^{b/\cos\phi} \frac{\rho d\rho}{\sqrt{1-\rho^2}} = -8 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sqrt{1-\rho^2} d\phi = -8 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sqrt{\cos^2\phi - b^2} \frac{d\rho}{\cos\phi} + 2\pi \quad (7)$$

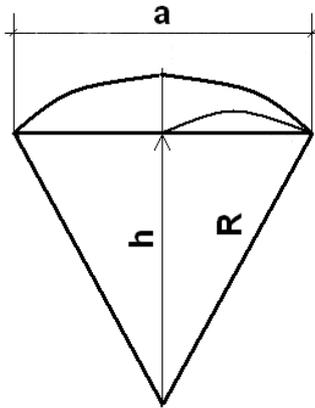


Рис.1. Схема расчета энергетической освещенности элементарной площадки

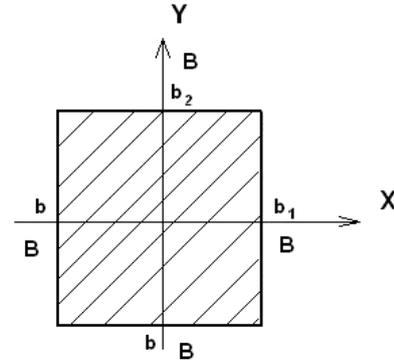


Рис.2. Полярные коэффициенты элементарной площадки

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

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

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, вытянутыми 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 основозадающие 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:

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

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

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

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

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

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.

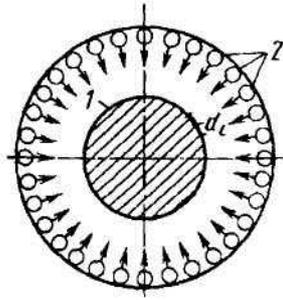


Рис.3. Инфракрасный имитатор:  
1 - испытываемый образец; 2 –  
излучатели.

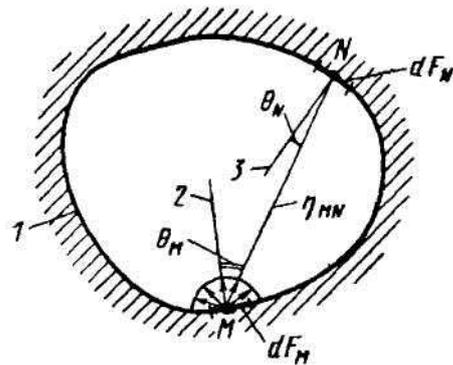


Рис.4. Замкнутая система тел: 1 – диффузно  
излучающая поверхность F; 2, 3 – нормали к  
поверхностям в точках M и N соответственно.

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).

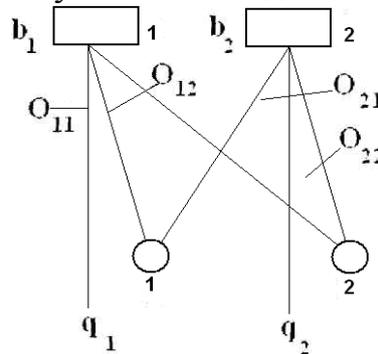


Рис.5. Система дискретно излучающих источников.

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.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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 ТГТУ, 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.

#### Аннотация

**Определение интенсивности теплового излучения на рабочих местах с учетом энергетической освещенности тепловых источников.** Беликов А. С., Шаломов В. А., Широкова Е. А., Рагимов С. Ю. В статье рассматривается усовершенствование методики исследования термодинамической напряженности на рабочих местах с использованием физического моделирования и энергетической освещенности с учетом параметров источников теплового излучения.

#### Анотація

**Визначення інтенсивності теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням енергетичної освітленості теплових джерел.** Беліков А. С., Шаломов В. А., Широкова О. А., Рагімов С. Ю. У статті розглядається удосконалення методики дослідження термодинамічної напруженості на робочих місцях з використанням фізичного моделювання та енергетичної освітленості з урахуванням параметрів джерел теплового випромінювання.

#### Abstract

**Determination of thermal radiation in the workplace, taking into account the thermal energy light sources.** Belikov A., Shalomov V., Shirokova O., Rahimov S. This article discusses advances in methodology research thermodynamic tension in the workplace, using physical modeling and irradiance within the parameters of heat sources.