

Бобылев В. П. /к. т. н./,
Иванов И. И. /к. т. н./
НМетАУ

Методика расчета показателей защитных свойств теплоотражающего экрана

Проанализированы негативные последствия воздействия интенсивного теплового излучения на здоровье работников, рассмотрены пути снижения его до нормативного уровня и особенности применения теплоотражающих экранов. На основе решения системы уравнений радиационного теплообмена получены зависимости для оценки показателей защитных свойств экрана. Показана эффективность разработанной методики для расчета плоского многослойного экрана при использовании различных материалов для его изготовления, разной степени черноты излучающей и облучаемой поверхностей. Методика может быть использована в инженерных расчетах средств защиты от теплового излучения. Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: тепловое излучение, экран, радиационный теплообмен, защитные свойства, степень черноты, методика расчета

Analyzed the negative effects of intense thermal radiation on the health of workers, considered ways to reduce it to the standard level and especially the use of heat-reflecting shields. Based on the solution of the equations of radiative heat transfer is obtained according to evaluate the protective properties of the screen. The efficiency of the developed method was demonstrated for the calculation of the flat multi-layer screen when using different materials for its manufacture, different degrees of blackness of the radiating and irradiated surfaces. The technique can be used in engineering calculations protection against heat radiation.

Keywords: thermal radiation, screen, radiation heat transfer, protective properties, the degree of blackness, the method of calculating

Введение

В металлургическом производстве проблема защиты работников от тепловых излучений стоит крайне остро. Персонал часто находится вблизи расплавленного или нагретого металла, пламени, горячих поверхностей. Общий радиационный фон, формируемый этими источниками, в горячих цехах 350-900 Вт/м², а на отдельных участках облученность может достигать 12-15 кВт/м².

Воздействие теплового излучения на организм проявляется в повышении температуры кожи, нарушении терморегуляции и перегреве организма. Сильное облучение в условиях высокой температуры и влажности воздуха в рабочем помещении и интенсивности выполняемой работы может стать причиной теплового удара. Он проявляется в головной боли, головокружении, учащении пульса, ускорении дыхания, падении сердечной деятельности, потере сознания. В крови, лимфе, спинномозговой жидкости появляются специфические биологически активные вещества, наблюдаются нарушения обменных процессов, изменяется функциональное состояние центральной нервной системы. Интенсивное длительное облучение глаз, помимо ожогов и конъюнктивита, вызывает повреждение сетчатки, «инфракрасную» катаракту.

Интенсивность теплового облучения работников регламентируется ГОСТ 12.1.005-88: от нагретых поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов до 35 Вт/м² при облучении более 50 % поверхности тела; 70 Вт/м² при облучении от 25 до 50 % поверхности тела; 100 Вт/м² – при облучении не более 25 % поверхности тела. От открытых источников (нагретые металл и стекло, открытое пламя) интенсивность теплового облучения не должна превышать 140 Вт/м² при облучении не более 25 % поверхности тела и обязательном использовании средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз. Если интенсивность облучения более 3 кВт/м², то лучистый поток становится особо вредным производственным фактором.

Нормы ограничивают также температуру нагретых поверхностей и ограждений рабочих мест, которая не должна превышать 45 °С; для оборудования, внутри которого температура близка к 100 °С, температура на его поверхности должна быть не выше 35 °С.

Для защиты работников от перегрева используется дистанционное управление ходом технологического процесса; теплоизоляция поверхностей источников излучения; воздушное и водо-воздушное душирование рабочих мест;

устройство специально оборудованных комнат, кабин или рабочих мест для кратковременного отдыха с подачей в них кондиционированного воздуха; водяные и воздушные завесы; средства индивидуальной защиты; специальная одежда и обувь.

Постановка задачи

Одним из самых эффективных способов защиты от тепловых излучений является экранирование излучающих поверхностей. Теплоотражающие экраны имеют низкую степень черноты материала, вследствие чего значительную часть падающей на них лучистой энергии они отражают в обратном направлении. В качестве теплоотражающих материалов широко используют альфоль, листовой алюминий, оцинкованную сталь. При расчете таких экранов упрощенно принимают одинаковой степень черноты излучающей, тепловоспринимающей, а часто и экранной поверхностей [1]. Это приводит к существенной разнице в расчетных и фактических показателях их эффективности даже для одинарных экранов. Эта разница становится неприемлемой при защите от мощных тепловых потоков, когда необходима установка нескольких простых экранов с шагом 20-25 мм или многослойных экранов. Наружные поверхности их выполняют из металлического листа, а в воздушных прослойках укладываются ряды гладкого или гофрированного альфоля с зазором до 5 мм, что снижает конвективный теплообмен между слоями и улучшает теплозащитные свойства экрана [2].

Задачей настоящей работы является получение универсальной модели радиационного теплообмена в системе «излучатель – сложный экран – приемник» и разработка на ее базе методики расчета показателей эффективности экрана при использовании различных материалов для его изготовления, разной степени черноты излучающей и облучаемой поверхностей.

Результаты работы

Показателями защитных свойств экрана являются степень экранирования μ , кратность ослабления теплового потока m и коэффициент эффективности η :

$$\mu = \frac{T_1}{T_3}; \quad m = \frac{q_{1,2}}{q_{3,2}}; \quad \eta = \frac{q_{1,2} - q_{3,2}}{q_{1,2}},$$

где T_3, T_1 – температуры наружной поверхности экранного ограждения и поверхности источника; $q_{1,2}, q_{3,2}$ – плотность теплового потока до и после установки экрана.

Для двух плоскопараллельных поверхностей при отсутствии экрана

$$q_{1,2} = \epsilon_{np} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4),$$

где $\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$ – приведенная степень черноты системы «источник – приемник излучения»;

ϵ_1, ϵ_2 – степень черноты их поверхностей; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Больцмана; T_2 – температура объекта облучения.

Расчетная схема лучистого теплопереноса в многослойном экране при различной степени черноты излучающей и тепловоспринимающей поверхностей, а также экранных поверхностей ($\epsilon_1 \neq \epsilon_2 \neq \epsilon_{31} \neq \epsilon_{32} \neq \dots \neq \epsilon_{3n}$) показана на рис. 1.

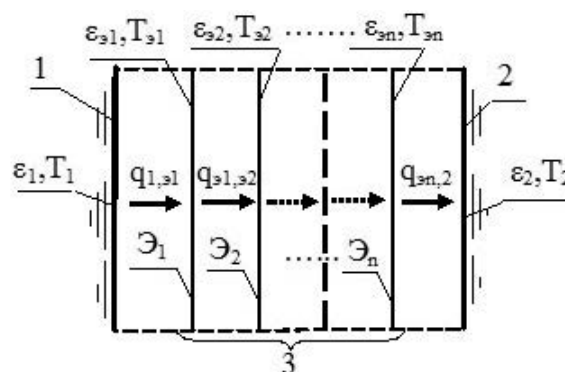


Рис. 1. Расчетная схема тонкостенного теплоотражающего экрана:

1 – источник излучения; 2 – тепловоспринимающая поверхность; 3 – экран; $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_n$ – экранные поверхности

Термическим сопротивлением теплопроводности слоев тонкостенного экрана $R_{3i} = \frac{\delta_{3i}}{\lambda_{3i}}$ при отсутствии теплоизоляции можно пренебречь, поэтому по их толщине отсутствует температурный перепад. Здесь δ_{3i} – толщина i -го слоя экрана; λ_{3i} – коэффициент теплопроводности его материала.

Тогда плотность теплового потока на экранные поверхности и приемник излучения:

$$q_{1,31} = \epsilon_{np1} \sigma_0 (T_1^4 - T_{31}^4); \tag{1}$$

$$q_{31,32} = \epsilon_{np2} \sigma_0 (T_{31}^4 - T_{32}^4); \tag{2}$$

$$q_{3(n-1),3n} = \epsilon_{nprn} \sigma_0 (T_{3(n-1)}^4 - T_{3n}^4); \tag{n}$$

$$q_{3n,2} = q_{3,2} = \epsilon_{np(n+1)} \sigma_0 (T_{3n}^4 - T_2^4), \tag{n+1}$$

где $\epsilon_{np1} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_{31}} - 1}$; $\epsilon_{np2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{31}} + \frac{1}{\epsilon_{32}} - 1}$; ...;

$\epsilon_{nprn} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{3(n-1)}} + \frac{1}{\epsilon_{3n}} - 1}$; $\epsilon_{np(n+1)} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{3n}} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$ –

приведенная степень черноты систем «излучатель – экран 1», «экран 1 – экран 2», ..., «экран

$(n - 1)$ – экран n », «экран n – приемник»; $T_{э1}, T_{э2}, \dots, T_{э(n-1)}, T_{эн}$ – температура соответствующих экранных поверхностей.

В стационарном режиме $q_{1,э1} = q_{э1,э2} = \dots = q_{э(n-1),эн} = q_{эн,2} = q_{э,2}$. Из системы уравнений (1) $\div (n + 1)$ получим:

– плотность теплового потока на облучаемую поверхность

$$q_{э,2} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)};$$

– температура экранных поверхностей

$$T_{э1} = \sqrt[4]{T_1^4 - \frac{(T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{э1}} - 1 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)}};$$

$$T_{э2} = \sqrt[4]{T_1^4 - \frac{(T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{э1}} + \frac{1}{\varepsilon_{э2}} - 2 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)}}; \dots$$

$$T_{эk} = \sqrt[4]{T_1^4 - \frac{(T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{эk}} + 2 \sum_{j=1}^{k-1} \frac{1}{\varepsilon_{эj}} - k \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)}}; \dots$$

$$T_{эн} = \sqrt[4]{T_1^4 - \frac{(T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{эн}} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{\varepsilon_{эj}} - n \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)}};$$

– степень экранирования, кратность ослабления теплового потока и коэффициент эффективности экрана

$$\mu = \frac{T_1}{\sqrt[4]{T_1^4 - \frac{(T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{эн}} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{\varepsilon_{эj}} - n \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)}}};$$

$$m = 1 + \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad \eta = \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - (n+1)}$$

В частном случае, когда $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{э1} = \varepsilon_{э2} = \dots = \varepsilon_{эн} = \varepsilon$

$$m = 1 + \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon} - n}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} = n + 1.$$

Если $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon; \varepsilon_{э1} = \varepsilon_{э2} = \dots = \varepsilon_{эн} = \varepsilon_j; \varepsilon \neq \varepsilon_j$

$$m = 1 + \frac{2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{эi}} - n}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} = 1 + n \frac{2 - \varepsilon_j}{2 - \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_j}.$$

Указанные частные решения совпадают с известными, например, приведенными в [3, 4].

В качестве примера рассмотрен экран, установленный между обшивкой печи из стальных окисленных листов ($\varepsilon_1 = 0,82; t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) и работником (степень черноты кожных покровов $\varepsilon_2 = 0,78; t_2 = 34 \text{ }^\circ\text{C}$). Наружные поверхности его выполнены из листовой прокатной стали ($\varepsilon_{э1} = \varepsilon_{э5} = 0,56$), а внутри размещены три слоя альфоля ($\varepsilon_{э2} = \varepsilon_{э3} = \varepsilon_{э4} = 0,08$).

Полученные показатели защитных свойств этого экрана: $\mu = 1,63; m = 52,37; \eta = 0,98$; плотность теплового потока на работника $q_{э,2} = 47,5 \text{ Вт/м}^2$. На рис. 2 приведено распределение температур в экране.



Рис. 2. Распределение температур в тонкостенном многослойном экране

Если для теплозащиты используются простые одинарные экраны с одинаковой степенью черноты $\varepsilon_{э1} = \varepsilon_{э2} = \dots = \varepsilon_{эн} = \varepsilon_j$, то из условия $q_{э,2} = [q_{э,2}]$ может быть определено их количество:

$$n \geq \frac{\varepsilon_j}{2 - \varepsilon_j} \left(\frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{[q_{э,2}]} - \frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2} + 1 \right),$$

где $[q_{э,2}]$ – нормативная интенсивность теплового облучения работников по ГОСТ 12.1.005-88.

Так, в условиях, приведенных в примере, для $[q_{3,2}] = 35; 70; 100; 140 \text{ Вт/м}^2$ необходимое число одинарных экранов из алюминиевых листов с окисленной поверхностью ($\epsilon_s = 0,15$) составит соответственно $n \geq 8,54; 4,25; 2,91; 2,04$. Т. е., 9 экранов обеспечат $q_{3,2} < 35 \text{ Вт/м}^2$; пять – $q_{3,2} < 70 \text{ Вт/м}^2$, а для $q_{3,2} < 100 \text{ Вт/м}^2$ и $q_{3,2} < 140 \text{ Вт/м}^2$ потребуется установка не менее 3 экранов.

Выводы

Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать в заданных условиях эксплуатации показатели эффективности защиты от излучения с помощью плоского многослойного теплоотражающего экрана при использовании различных материалов для его изготовления, разной степени черноты излучающей и облучаемой поверхностей, обоснованно выбрать его конструкцию, обеспечивающую снижение теплового потока излучением и температуры ограждений на рабочем месте до нормативной величины. Методика может быть использована

на для практических расчетов экранов, предназначенных для защиты работников от теплового излучения.

Библиографический список

1. Беляев В. М., Миронов В. М., Сечин А. И. Расчет и проектирование средств защиты: Учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 184 с.
2. Патент РФ 2229910. Способ ослабления воздействия потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков, огнестойкий экран и огнезащитное укрытие на его основе; А62С2/00 / В. Л. Страхов, А. М. Крутов, С. В. Заикин и др. – № 2003102427/12; Заявл. 30.01.2003; Опубл. 10.06.2004, Бюл. № 8. – 3 с.: ил.
3. Бабалов А. Ф. Промышленная теплозащита в металлургии. – М.: Металлургия, 1971. – 360 с.
4. Румянцев В. Д. Теория тепло- и массообмена: Учеб. пособ. для ВТУЗов. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.

Поступила 25.09.2014

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ
«Металлургическая и горнорудная промышленность»



Единственное в Украине специализированное издание, освещающее вопросы научной и практической деятельности специалистов горно-металлургического комплекса, а также все проблемы ГМК. Журнал издаётся с 1960 г. Распространяется по подписке в Украине и за рубежом.

Тираж – 1000 экз.

Индекс: 74311 – журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность» на рус. языке. Стоимость годовой подписки (6 номеров) – **2 670 грн**;

Индекс: 49501 – журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность», CD-ROM. Стоимость годовой подписки (6 номеров) – **1 944 грн**;

Главная задача журнала – рекламная поддержка передовых технологий и разработок, публикация информации о новейших научно-технических достижениях исследовательских коллективов, институтов, предприятий и организаций ГМК Украины.

ЖУРНАЛ ДЛЯ ТЕХ, КТО РАБОТАЕТ В МЕТАЛЛУРГИИ И ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ!

Стоимость рекламы (в гривнях):

Площадь, формат	Чёрно-белая	Полноцветная
1 стр. обложки (A5)		7 000
4 стр. обложки: страница (A4)	–	5 000
на страницах журнала: страница (A4)	1 000	2 000
½ стр.	500	1 000

Вложение в журнал рекламных листовок: А4 – 1 грн; А5 – 0,5 грн.

Публикация статьи на правах рекламы – 750 грн за страницу.

Адрес редакции:

49027, Днепропетровск, ул. Дзержинского, 23,
 тел/факс (0562) 46-12-95, (056) 744-81-66.

E-mail: metinfo@metinform.dp.ua; office@metajournal.com.ua; <http://www.metajournal.com.ua/>