

УДК 620.179

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛООВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

С.Н. МЕШКОВ

Указаны преимущества излучательных источников теплового возбуждения для систем теплового контроля. Приведены методики расчета распределения плотности потока энергии, формируемой полосовыми и площадочными источниками. Рассмотрены случаи нагрева цилиндрического объекта полосовым источником.

The advantages of radiation sources of thermal excitation for systems of thermal control are described. The techniques of calculation of distribution density of energy flow which is formed by band and area sources are presented. The cases of heating of cylindrical object by the band source are considered.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин, сдерживающих развитие теплового неразрушающего контроля (ТНК), является несоответствие между требованиями к нагреву объектов контроля (ОК) и характеристиками реальных источников теплового возбуждения (ИТВ). От выбора ИТВ зависит эффективность ТНК, в частности, такие его показатели, как чувствительность и производительность [1]. Особенностью ТНК является то, что для каждого конкретного объекта, учитывая его форму, размеры и теплофизические характеристики, необходимо выбирать свой ИТВ. Отечественная промышленность не выпускает ИТВ для ТНК. Такая ситуация вынуждает разработчиков создавать оригинальные ИТВ [1].

В ТНК носителем информации о наличии дефектов в объекте контроля является температурное поле на его поверхности. Однако это поле является производным, вторичным от температурного поля, которое создается ИТВ. К сожалению, число публикаций, посвященных описанию температурных полей, создаваемых ИТВ для ТНК, невелико [2].

Задачей проектирования ИТВ для ТНК является обеспечение требуемой плотности потока на заданной площади ОК. Другими словами — формирование первичного температурного поля, однородного по контролируемой поверхности.

Сходная задача описания и реализации световых полей решается в светотехнике [3, 4] и при ИК — сушке [4–8], поэтому ряд подходов к решению этой задачи для ТНК были использованы в данной работе.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИТВ

Согласно ОСТ 1.42107 — 81 Минавиапрома ИТВ подразделяют на 1) точечные; 2) полосовые; 3) пло-

щадочные; 4) объемные. Самыми часто применяемыми являются полосовые и площадочные, которые позволяют полнее использовать возможности современных регистрирующих устройств (тепловизоров, радиометров) и являются оптимальными с точки зрения чувствительности и производительности

Наиболее перспективными для ТНК являются ИТВ излучательного типа, которые чаще всего применяются в системах для обнаружения внутренних дефектов в сплошных материалах [9].

Преимуществами ИТВ излучательного типа являются: бесконтактность, большая скорость нагрева, простота управления пространственными характеристиками излучателей, возможность высокой степени локальности воздействия на ОК, уменьшенный расход энергии на нагрев единицы поверхности изделия, экологическая чистота, высокая степень автоматизации технологического процесса ТНК [10–12].

До сих пор терминология, относящаяся к ИТВ излучательного типа, не определена никакими стандартами, хотя в этом направлении делаются некоторые попытки, не идущие далее рекомендаций [13]. ИК-техника, используемая для нагрева, имеет много общих черт со светотехникой. Светотехнические излучатели и источники ИК-нагрева описываются энергетическими и пространственными характеристиками. Как ИК-техника, так и светотехника используют первичные источники излучения, те же методы перераспределения лучистого потока в нужных направлениях посредством отражателей, концентраторов (внешних, иногда внутренних), те же способы питания от электрической сети [14, 15].

Основными параметрами ИТВ являются: плотность потока энергии, размеры и расположение зоны нагрева (пространственно-энергетические характеристики), изменение потока во времени, КПД, уро-

вень помех, воздействующих на радиометр, габаритные размеры, стоимость.

В настоящее время все более широкое применение получают ИТВ, сконструированные на основе галогенных источников. Перспективность применения галогенных источников для ТНК обусловлена тем, что они по своим энергетическим, эксплуатационным и конструкционным параметрам превосходят все известные ИК-излучатели [16–18]. Существенными преимуществами применения галогенных источников являются:

- малая тепловая инерционность;
- возможность гибкого управления распределения потоков лучистой энергии по поверхности нагреваемого ОК;

- высокая удельная плотность излучения с единицы площади тела накала (до $0,7 - 1,7 \times 10^6$ Вт/м²).

Благодаря этому, галогенные ИТВ широко применяются в тепловой дефектометрии и тепловой томографии.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЛОСОВЫХ И ПЛОЩАДОЧНЫХ ИТВ НА ПЛОСКОСТИ

Все рассуждения проводятся на основе предположения, что элементарный полосовой излучатель подчиняется закону Ламберта. Излучение и поглощение кварцевых колб не учитывалось, что согласно [19] приводит к незначительной ошибке (1–4 %). Предполагалось, что вольфрамовая нить имеет равномерную по длине энергетическую яркость.

Для излучателя, имеющего форму цилиндра радиуса r и длиной L (рис. 1), можно записать:

$$B = \frac{Q}{8\pi r L}, \quad (1)$$

где B – энергетическая яркость, Q – мощность излучателя.

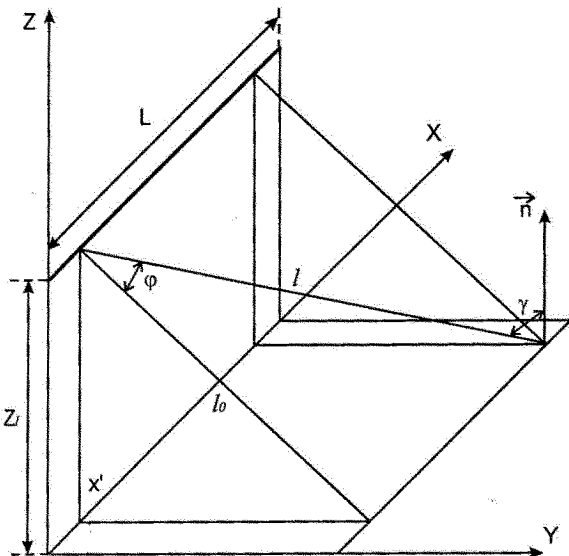


Рис. 1. К расчету плотности потока энергии, создаваемого полосовым ИТВ на плоскости

Плотность теплового потока (облученность) в точке (x, y) (рис. 2), созданную одним линейным цилиндрическим излучателем, расположенным на расстоянии Z_1 от облучаемой плоскости, можно определить следующим образом.

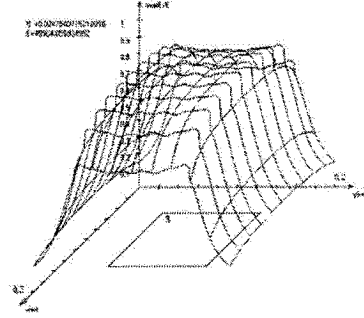


Рис. 2. Распределение плотности потока энергии на плоской поверхности ($N = 6$; $Q = 425$ Вт; $L = 80$ мм; $Z = 40$ мм)

Поскольку $dI = B d\delta \cos \varphi = 2Br \cos \varphi dx$, то дифференциал плотности теплового потока можно представить в виде

$$dE = \frac{Q}{4\pi L^2} \cos \varphi \cos \gamma dx. \quad (2)$$

Чтобы получить плотность теплового потока в точке (x, y) , требуется проинтегрировать выражение (2) по длине источника теплового излучения. Для этого, исходя из геометрических соображений, рассмотрим зависимости переменных, входящих в выражение (2).

$$x = x' + l_0 \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

$$dx = \frac{l_0}{\cos^2 \varphi} d\varphi, \quad (4)$$

$$\cos \gamma = \frac{Z_1}{l} = \frac{Z_1}{l_0} \cos \varphi = \frac{Z_1}{\sqrt{Z_1^2 + y^2}} \cos \varphi. \quad (5)$$

С помощью формул (3–5) представим дифференциал плотности теплового потока как функцию угла φ .

$$dE = \frac{QZ_1}{4\pi L(Z_1^2 + y^2)} \cos^2 \varphi d\varphi. \quad (6)$$

Плотность теплового потока в точке (x, y) , созданная одним излучателем, равна:

$$E = \int_0^{\varphi_1} dE + \int_0^{\varphi_2} dE,$$

где

$$\varphi_1 = \arctg \frac{x}{\sqrt{Z_1^2 + y^2}}, \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{L-x}{\sqrt{Z_1^2 + y^2}}. \quad (8)$$

Окончательно получаем, что плотность теплового потока, создаваемая одним цилиндрическим полосовым излучателем, составляет [20, 21].

$$E = \frac{QZ_l}{8\pi L(Z_l^2 + y^2)} \left(\operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{Z_l^2 + y^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{Z_l^2 + y^2}} \right) + \operatorname{arctg} \frac{L-x}{\sqrt{Z_l^2 + y^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{L-x}{\sqrt{Z_l^2 + y^2}} \right) \right), \quad (9)$$

Для системы из N излучателей облученность может быть рассчитана как суперпозиция полей облученности, создаваемых каждым излучателем в отдельности [20].

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i Z_{li}}{8\pi L_i (Z_{li}^2 + (y - y_i)^2)} \left(\operatorname{arctg} \frac{x - x_i}{\sqrt{Z_{li}^2 + (y - y_i)^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{x - x_i}{\sqrt{Z_{li}^2 + (y - y_i)^2}} \right) + \operatorname{arctg} \frac{L_i - x + x_i}{\sqrt{Z_{li}^2 + (y - y_i)^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{L_i - x + x_i}{\sqrt{Z_{li}^2 + (y - y_i)^2}} \right) \right), \quad (10)$$

где (x_i, y_i) – координаты расположения начала i -го излучателя.

В случае одинаковых излучателей при замене

$$x' = \frac{x}{L}, \quad y' = \frac{y}{L}, \quad Z'_l = \frac{Z_l}{L}, \quad Q' = \frac{Q}{L^2}, \quad (11)$$

имеем

$$E' = \sum_{i=1}^N \frac{Q' Z'_l}{8\pi (Z'^2_l + (y' - y'_i)^2)} \left(\operatorname{arctg} \frac{x' - x'_i}{\sqrt{Z'^2_l + (y' - y'_i)^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{x' - x'_i}{\sqrt{Z'^2_l + (y' - y'_i)^2}} \right) + \operatorname{arctg} \frac{1 - x' + x'_i}{\sqrt{Z'^2_l + (y' - y'_i)^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{1 - x' + x'_i}{\sqrt{Z'^2_l + (y' - y'_i)^2}} \right) \right),$$

$$+ \frac{1}{2} \sin \left(2 \operatorname{arctg} \frac{1 - x' + x'_i}{\sqrt{Z'^2_l + (y' - y'_i)^2}} \right), \quad (12)$$

Распределение плотности потока энергии, полученное согласно (12), показано на рис. 2.

При наличии отражателя можно использовать предыдущие формулы. Для этого достаточно определить геометрическое расположение мнимых источников и размеры облучаемой части плоскости.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЛОСОВОГО ИТВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Практический интерес представляет взаимодействие полосового ИТВ с объектом цилиндрической формы (ОЦФ). Этот случай часто приходится рассматривать, например, при ТНК элементов авиационной техники.

Возможны два варианта расположения полосового ИТВ относительно объекта цилиндрической формы:

- положение ИТВ параллельно оси вращения ОЦФ;
- положение ИТВ перпендикулярно оси вращения ОЦФ.

Первый вариант является традиционным и часто применяется в комплексах ТНК [22–24]. Особенностью полосовых галогенных ИТВ является требование их строгой горизонтальной установки (отклонение не более 5°). В некоторых случаях для компоновки комплексов ТНК оптимальным является второй вариант. Анализ показал, что оба варианта не имеют теоретического описания.

Положение ИТВ параллельно оси вращения ОЦФ

Найдем распределение плотности потока энергии на поверхности цилиндра в точке (x, α) (рис. 3), созданное одним линейным цилиндрическим излучателем, расположенным параллельно оси вращения.

Найдем угол γ , образованный двумя векторами с началом в точке $(x, R \sin \alpha, R \cos \alpha)$. Координаты конца первого вектора – $(x - l_0 \operatorname{tg} \varphi, 0, Z_l)$, где

$$l_0 = \sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}. \quad (13)$$

Конец вектора, перпендикулярного поверхности цилиндра, имеет координаты $(x, kR \sin \alpha, kR \cos \alpha)$, где k любое число большее единицы. Координаты рассматриваемых векторов:

$$\begin{aligned} &(-l_0 \operatorname{tg} \varphi, -R \sin \alpha, Z_l - R \cos \alpha), \\ &(0, (k-1)R \sin \alpha, (k-1)R \cos \alpha). \end{aligned}$$

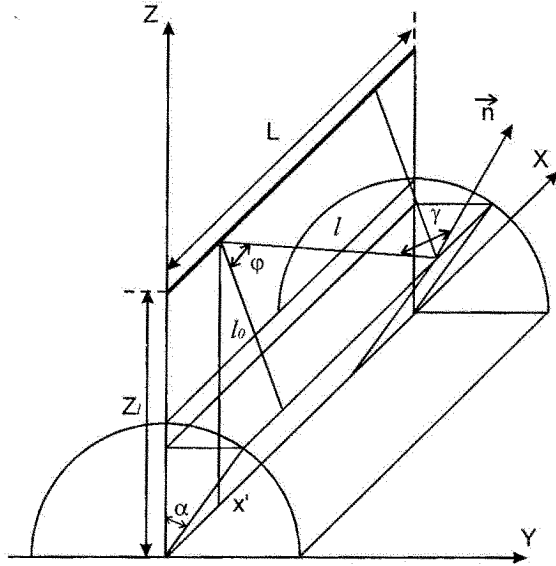


Рис. 3. К расчету плотности потока энергии в случае, когда ИТВ параллельно оси вращения ОЦФ

Таким образом, для любой точки цилиндра (x, α) можно записать:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{(k-1)(-R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha) R \cos \alpha)}{(k-1)R\sqrt{l_0^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} = \\ &= \frac{(Z_l - R \cos \alpha) R \cos \alpha - R^2 \sin^2 \alpha}{R l_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi + 1}} = \\ &= \frac{(Z_l - R \cos \alpha) R \cos \alpha - R^2 \sin^2 \alpha}{R l_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi + 1}} = \\ &= \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha - R \sin^2 \alpha}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} \cos \varphi. \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, при $\gamma = \pm \frac{\pi}{2}$ имеем

$$\cos \gamma = \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha - R \sin^2 \alpha}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} \cos \varphi = 0. \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что при облучении цилиндрической поверхности угол γ между лучом и нормалью равен $\pi/2$ при выполнении условия:

$$(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha - R \sin^2 \alpha = 0, \quad (16)$$

где
$$Z_l = \frac{R \sin^2 \alpha}{\cos \alpha} + R \cos \alpha, \quad (17)$$

$$\alpha = \pm \arccos \frac{R}{Z_l}. \quad (18)$$

Таким образом, $E = 0$ при любом угле, не принадлежащем интервалу $(-\alpha, \alpha)$.

Облученность, которая создается одним полосовым излучателем на поверхности цилиндра радиуса R можно определить следующим образом [25]:

$$dE = \begin{cases} \frac{Q((Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha - R \sin^2 \alpha)}{4\pi L(R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2)} \times \\ \times \cos^2 \varphi d\varphi, |\alpha| < \left| \arccos \frac{R}{Z_l} \right|, \\ 0, |\alpha| \geq \left| \arccos \frac{R}{Z_l} \right|. \end{cases} \quad (19)$$

Следовательно

$$E = \int_0^{\varphi_1} dE + \int_0^{\varphi_2} dE, \quad (20)$$

где

$$\varphi_1 = \arctg \frac{x}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \quad (21)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{L-x}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}. \quad (22)$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{Q(\cos \alpha (Z_l - R \cos \alpha) - R \sin^2 \alpha)}{8\pi L(R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2)} \times \\ &\times \left(\arctg \frac{x}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} + \right. \\ &+ \frac{1}{2} \sin \left(2 \arctg \frac{x}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} \right) + \\ &+ \arctg \frac{L-x}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} + \\ &+ \left. \frac{1}{2} \sin \left(2 \arctg \frac{L-x}{\sqrt{R^2 \sin^2 \alpha + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} \right) \right), \end{aligned}$$

при
$$|\alpha| < \left| \arccos \frac{R}{Z_l} \right|. \quad (23)$$

Пример применения полученного выражения (19 – 23) для расчета распределения плотности потока энергии по поверхности объекта цилиндрической формы ($R = 40$ мм) приведен на рис. 4.

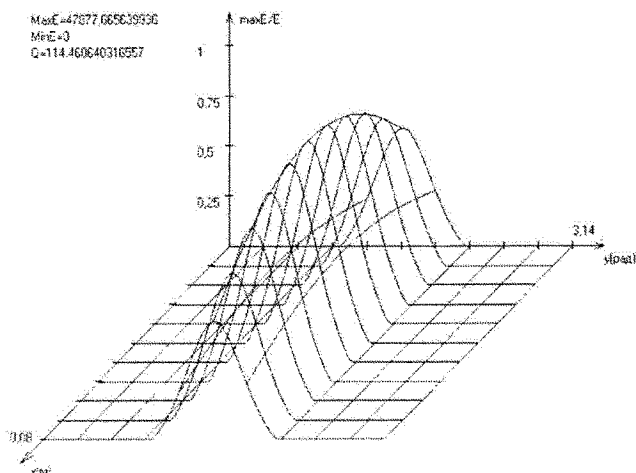


Рис. 4. Распределение плотности потока энергии по поверхности объекта цилиндрической формы ($Q = 500$ Вт; $L = 80$ мм; $Z_1 = 30$ мм; $R = 40$ мм)

Положение ИТВ перпендикулярно оси вращения ОЦФ

Найдем плотность потока энергии на поверхности цилиндра в точке (x, α) (рис. 5), созданную одним линейным цилиндрическим излучателем, расположенным перпендикулярно оси вращения ОЦФ.

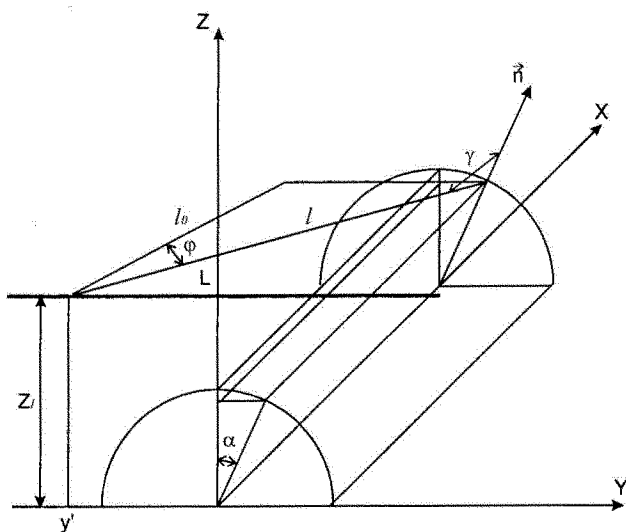


Рис. 5. К расчету плотности потока энергии в случае, когда ИТВ перпендикулярно оси вращения ОЦФ

Поскольку,

$$dE = \frac{Q}{4\pi Ll^2} \cos\varphi \cos\gamma dy, \quad (24)$$

то для решения задачи нахождения (теплового потока в точке (x, α)) требуется проинтегрировать выражение (24) по длине ИТВ. Для этого рассмотрим

зависимости переменных, входящих в выражение (24).

$$l_0 = \sqrt{x^2 + (Z_1 - R \cos\alpha)^2}, \quad (25)$$

$$l = \frac{l_0}{\cos\varphi} = \frac{\sqrt{x^2 + (Z_1 - R \cos\alpha)^2}}{\cos\varphi}, \quad (26)$$

$$y = R \sin\alpha = y' + l_0 \operatorname{tg}\varphi, \quad (27)$$

$$dy = \frac{l_0}{\cos^2\varphi} d\varphi = \frac{\sqrt{x^2 + (Z_1 - R \cos\alpha)^2}}{\cos^2\varphi} d\varphi, \quad (28)$$

Найдем угол γ , образованный двумя векторами с началом в точке $(x, R \sin\alpha, R \cos\alpha)$. Координаты конца первого вектора – $(0, R \sin\alpha - l_0 \operatorname{tg}\varphi, Z_1)$. Конец вектора, перпендикулярного поверхности цилиндра, имеет координаты $(x, kR \sin\alpha, kR \cos\alpha)$, где k любое число большее единицы. Координаты рассматриваемых векторов:

$$(-x, -l_0 \operatorname{tg}\varphi, Z_1 - R \cos\alpha),$$

$$(0, (k-1)R \sin\alpha, (k-1)R \cos\alpha).$$

Таким образом, для любой точки цилиндра (x, α) можно записать

$$\begin{aligned} \cos\gamma &= \frac{(k-1)R(-l_0 \operatorname{tg}\varphi \sin\alpha + (Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha)}{(k-1)R\sqrt{x^2 + l_0^2 \operatorname{tg}^2\varphi + (Z_1 - R \cos\alpha)^2}} = \\ &= \frac{((Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha - l_0 \operatorname{tg}\varphi \sin\alpha)}{l_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2\varphi + 1}} = \\ &= \frac{((Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha - l_0 \operatorname{tg}\varphi \sin\alpha)}{l_0} \cos\varphi. \end{aligned} \quad (29)$$

Следовательно, при $\gamma = \pm \frac{\pi}{2}$ имеем

$$\cos\gamma = \frac{((Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha - l_0 \operatorname{tg}\varphi \sin\alpha)}{l_0} \cos\varphi = 0. \quad (30)$$

Из формулы (30) следует, что при облучении цилиндрической поверхности угол γ между лучом и нормалью перпендикулярен при выполнении условия:

$$(Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha - l_0 \operatorname{tg}\varphi \sin\alpha = 0, \quad (31)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{(Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha}{\sin\alpha \sqrt{x^2 + (Z_1 - R \cos\alpha)^2}}, \quad (32)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(Z_1 - R \cos\alpha) \cos\alpha}{\sin\alpha \sqrt{x^2 + (Z_1 - R \cos\alpha)^2}}, \quad (33)$$

Найдем облученность, создаваемую одним полосовым излучателем на поверхности цилиндра радиуса R.

$$dE = \begin{cases} \frac{Q(l_0 \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha + (Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha)}{4\pi L(x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2)} \times \\ \times \cos^2 \varphi d\varphi, |\gamma| < \frac{\pi}{2}, \\ 0, |\gamma| \geq \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (34)$$

Следовательно,

$$E = \int_0^{\varphi_1} dE + \int_0^{\varphi_2} dE, \quad (35)$$

где $y = R \sin \alpha = y' + l_0 \operatorname{tg} \varphi,$ (36)

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha + \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \quad (37)$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha - \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}. \quad (38)$$

Используя формулы (33–38), получим для плотности теплового потока:

$$E = \frac{Q(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{4\pi L(x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2)} \times \\ \times \left(\varphi_1 + \frac{1}{2} \sin 2\varphi_1 + \varphi_2 + \frac{1}{2} \sin 2\varphi_2 \right) + \\ + \frac{Q \sin \alpha}{8\pi L \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} (\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2), \quad (39)$$

где $\varphi_1 = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha + \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \\ \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha + \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} < \\ < \operatorname{arctg} \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \\ \operatorname{arctg} \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \\ \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha + \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} \geq \\ \geq \operatorname{arctg} \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}; \end{cases}$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha - \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \\ \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha - \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} < \\ < \operatorname{arctg} \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \\ \operatorname{arctg} \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}, \\ \operatorname{arctg} \frac{R \sin \alpha - \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}} \geq \\ \geq \operatorname{arctg} \frac{(Z_l - R \cos \alpha) \cos \alpha}{\sin \alpha \sqrt{x^2 + (Z_l - R \cos \alpha)^2}}. \end{cases}$$

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛОСОВОГО ГАЛОГЕННОГО ИТВ

В ходе исследований была поставлена задача теплового контроля элементов конструкции авиационных двигателей с сотовым покрытием. Они представляли кольца с радиусами 265, 235 мм и высотой 15 и 12 мм соответственно. Учитывая геометрию объекта, было решено использовать схему положения ИТВ, показанную на рис. 5. Нагрев ОЦФ осуществлялся по частям (секторам) при помощи полосового галогенного ИТВ по двухсторонней схеме. На рис. 6 показан результат расчета сектора равномерного нагрева, произведенного при помощи программы «Heat Form». Программа «Heat Form» была разработана на основе выражений (1) – (39).

В качестве исходных параметров для расчета приняты следующие: мощность ИТВ $P = 500$ Вт, высота площадки нагрева – 16 мм; сектор нагрева – 0,22 рад; высота ИТВ над ОК – 15 мм.

Программа «Heat Form», кроме указанных функций, позволяет:

- определять неравномерность нагрева на заданном участке плоскости или цилиндра (нахождение максимального и минимального значения облученности);

- определять мощность нагрева заданного участка плоскости или цилиндра;

- производить оценку возможности применения заданного ИТВ в зависимости от площади нагреваемой площадки;

- производить нахождение оптимального по равномерности облученности ИТВ при заданных ограничениях.

Анализ изображений поля облученности, показанный на рис. 6, позволяет определить его следующие свойства:

1. Размеры пятна равномерного нагрева по высоте меньше высоты ОЦФ 10 мм;
2. Сектор равномерного нагрева составляет 0,1 рад.

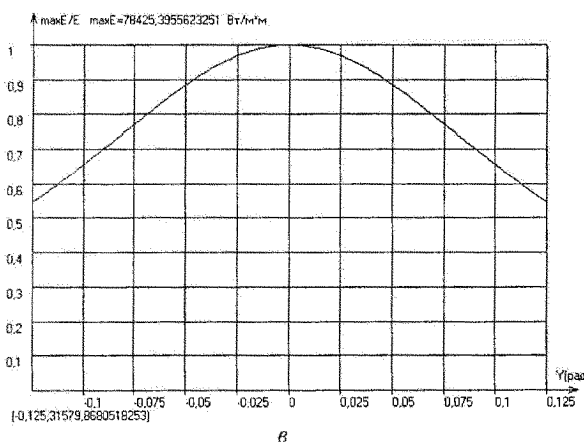
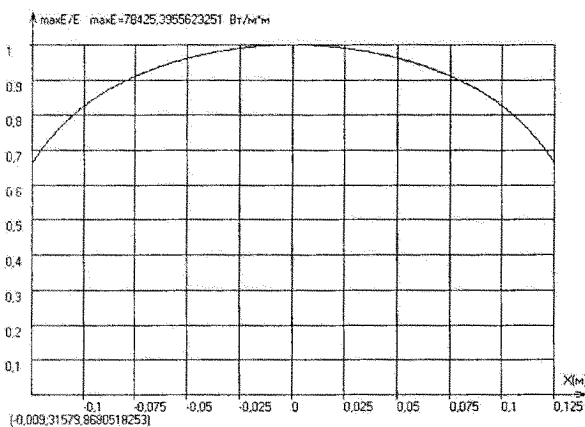
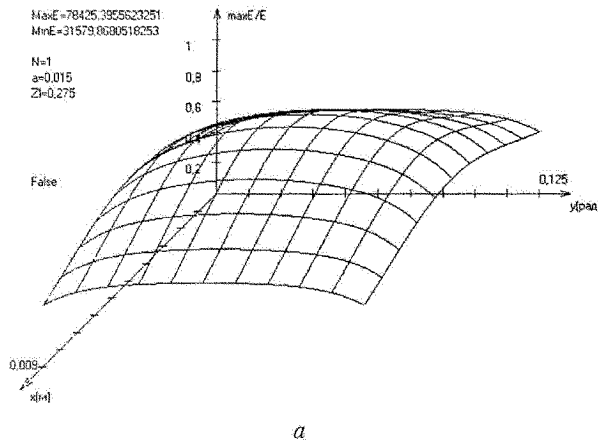


Рис. 6. Плотность потока энергии, формируемая полосовым ИТВ на поверхности ОЦФ:
 а – трехмерное; б – центральное сечение по X;
 в – центральное сечение по Y

Экспериментальные исследования излучателя, проведенные с помощью тепловизора, показали, что при времени нагрева $t = 5$ с размеры сектора равномерного нагрева ОЦФ по высоте составляют 14 мм, а размеры сектора по периметру ОЦФ – 0,22 рад. Эти результаты были приняты за исходные при разработке стенда и методики тепловизионного контроля [26].

Предварительные исследования показали, что отражатель за время нагрева (5 с) сильно нагревается (до 250 °С) и прогревает следующий холодный сектор еще до включения ИТВ. Кроме этого, отражатель увеличивает уровень фоновых засветок. Поэтому в разработанном стенде ИТВ использовался без отражателя.

ВЫВОДЫ

Проанализированы пути обеспечения равномерности нагрева поверхности объекта контроля при использовании нагревателей излучательного типа.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования привели к следующим результатам.

1. Разработана методика расчета плотности потоков энергии, создаваемых полосовыми ИТВ на плоской поверхности объекта контроля.

2. Разработана методика расчета плотности потоков энергии, создаваемых полосовыми ИТВ на поверхности ОЦФ в случаях:

- положение ИТВ параллельно оси вращения ОЦФ;

- положение ИТВ перпендикулярно оси вращения ОЦФ.

3. Разработана программа «Heat Form» расчета плотности потоков энергии, создаваемых ИТВ любой конструкции (полосовых, площадочных, с отражателями и без отражателей) для плоских объектов контроля и объектов цилиндрической формы.

4. На основании проведенных расчетов был разработан ИТВ для стенда, на котором производился тепловой контроль цилиндрических элементов авиационных двигателей с сотовым покрытием.

Литература. 1. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль: Справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 640 с. 2. Русак А.А., Юдовин З.М., Максимов А.И. Источник импульсного нагрева для активного теплового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1989. – № 9. – С. 88–91. 3. Рычков В.И., Пальцев М.Б. Расчет облученности и коэффициентов облученности от цилиндрических источников излучения с произвольным пространственным распределением лучистого потока // Труды Московского энергетического института. – 1971. – Вып. 92. – С. 57–65. 4. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. – М.: Энергия, 1972. – 360 с. 5. Борхерт Р., Юбиц В. Техника ИК-нагрева: Пер. с нем. / Под. ред. И.Б. Левитина. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с. 6. Дуценко В.П., Кучерук И.М. Исследование полей облученности некоторых «светлых» инфракрасных источников // Инженерно-физический журнал. – 1966. – № 11. – С. 296–300. 7. Скверчак В.Д., Плаксин Ю.М., Сыроедов В.И., Гинзбург А.М. Аналитические исследования взаиморасположения электрических генераторов ИК-излучения в термодинамических установках // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 6. – С. 53–57. 8. Рычков В.И. Сушка и нагрев ИК-излучением – в кн: Светотехника и ИК-техника, т. 3 – М.: ВИНТИ. – 1973. – С. 196–247. 9. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Гаптракипов А.А. Оптимизация решения производственной задачи теплового неразрушающего контроля // Материалы конференции. Третья Украинская науч-

но-техническая конференция «Неруйнівний контроль та технічна діагностика 2000». — Днепропетровск. — 2000. — С. 240–243. 10. *Левитин И.Б., Розов А.Ф.* Применение импульсного ИК-нагрева для пайки радиодеталей // Светотехника. — № 8. — 1974. — С. 46–48. 11. Импульсные источники света. / Под ред. И.С. Маршака. — М.: Энергия, 1978. — 472 с. 12. *Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И.* Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. — М.: Энергия, 1980. — 175 с. 13. *Левитин И.Б.* О терминологии, характеристиках и классификации средств ИК-облучательной техники // Светотехника. — 1976. — № 5. — С. 60–61. 14. *Синеглазов В.М., Протасов А.Р., Кеткович А.А.* Активная тепловая микроскопия. — Киев: Техніка, 1993. — 168 с. 15. *Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А.* ИК-излучатели: Пер. с польского И.Б. Левитина и В.И. Рачкова. — Л.: Энергия, 1978. — 408 с. 16. *Xavier P.V. Maldague* Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. — John Wiley & Sons, Inc., 2001, p. 684. 17. *Бекешко Н.А., Воронин И.Д., Соколов П.В.* Универсальный источник нагрева для активного теплового контроля // Дефектоскопия. — 1982. — № 9. — С. 34–36. 18. *Cernuschi F., Lamperti M., Marchesi R., Russo A.* Characterization of spatial light distribution of flash lamp systems / Abstracts of Conference “Quantitative Infrared Thermography” (QIRT-96), Stuttgart, Germany, September 2-5, 1996, p. 15–19. 19. *Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И.* Влияние нагретой кварцевой оболочки на спектральное распределение энергии излучения галогенных ламп накаливания // Электротехническая промышленность, сер. «Светотехнические изделия». — 1977. — вып. 3 (45). — С. 4–7. 20. *Мешков С.Н., Гантракинов А.А.* Площадочный нагреватель для активного теплового неразрушающего контроля (АТНК) // Збірник наукових праць, серія «Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів», випуск 7 «Неруйнівний контроль конструкційних та фун-

кціональних матеріалів», Львів — 2002. — С. 172–174. 21. *Стороженко В.А., Мешков С.Н., Гантракинов А.А.* Расчет оптимальных конструкционных параметров источников теплового возбуждения для активного теплового неразрушающего контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2002. — № 4. — С. 40–41. 22. *Стороженко В.А., Рапопорт Д.А., Денисов С.С., Волков Я.А.* Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля многослойных цилиндрических изделий // Дефектоскопия. — 1978. — № 6. — С. 102–103. 23. *Рапопорт Д.А., Стороженко В.А., Алямовский А.И., Денисов С.С.*, Механизированная установка для высокопроизводительного контроля цилиндрических углепластиковых изделий. Депон. ЦНИИ информации, 1978, № 271. 24. *Бекешко Н.А.* Тепловой дефектоскоп для контроля изделий цилиндрической и конической формы // Дефектоскопия. — 1978. — № 1. — С. 111–112. 25. *Мешков С.Н., Гантракинов А.А.* Расчет и моделирование тепловых полей, создаваемых нагревателями для активного теплового неразрушающего контроля. // Радиотехника. — Харьков, ХНУРЭ. — 2002. — № 129. — С. 173–178. 26. *Стороженко В.А., Мельник С.И., Мешков С.Н.* Тепловая дефектоскопия теплозащитных покрытий узлов авиадвигателей // 4-я Национальная научно-техническая конференция — выставка НКТД-2003 «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», 19–23 мая 2003 г., К., Материалы конференции. — С. 344–349.



Поступила в редколлегию 18.03.2005
Мешков Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры физики Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: тепловой неразрушающий контроль, термография, тепловизионная техника, метрология.