

УДК 535-1:631.365:004.942

А.А. ЗАВАЛИЙ

ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет», Симферополь

## КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ РАВНОМЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрены системы инфракрасного нагрева, содержащие один или два источника излучения, зеркально отражающие поверхности и одну или две плоские поверхности облучения. С использованием оптико-геометрических моделей построены поверхности зеркального отражения, обеспечивающие равномерный нагрев поверхностей облучения. На основе численного решения интегральных уравнений переноса энергии излучения в оптически прозрачной среде разработаны модели анализа теплового состояния рассматриваемых систем. Выполненный анализ теплового состояния систем инфракрасного нагрева показал, что простые оптико-геометрические модели позволяют создавать замкнутые системы инфракрасного теплообмена с зеркально отражающими поверхностями, обеспечивающие существенное выравнивание распределения потока излучения по поверхности облучения. Для повышения степени равномерности облучения возможно применение последовательной коррекции геометрической формы зеркально отражающих элементов систем, заключающейся в изменении положения участков поверхностей зеркального отражения и теплового анализа модифицированной системы.

**Ключевые слова:** тепловое моделирование, инфракрасный нагрев, зеркально отражающие поверхности.

### Введение

Тепловое инфракрасное облучение является распространенным методом сушки лакокрасочных покрытий поверхностей изделий авиационной промышленности и обеспечивает высокую прочность покрытий при низких затратах энергии на процесс сушки. Основным недостатком инфракрасной сушки является высокая неравномерность теплового воздействия, что приводит к неравномерности прочности покрытия и изменению его цветового оттенка [1]. В связи с этим актуальной задачей повышения качества покрытий является разработка методов, обеспечивающих равномерное тепловое облучение поверхностей сушки.

При разработке систем инфракрасного нагрева поверхностей используют источники излучения и зеркально отражающие поверхности, позволяющие распределять отраженное излучение по поверхности нагрева в соответствии с заданным правилом. Для распределения отраженного излучения используют решение уравнения Н.Г. Болдырева [2], задающего перераспределение потока излучения источника в пространстве:

$$\frac{dr(\varphi)}{r(\varphi)} = \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi - \alpha}{2} \right) d\varphi. \quad (1)$$

Уравнение (1) связывает радиус-вектор  $r$  положения точки поверхности зеркального отражателя с углом  $\varphi$  при заданных начальных значениях  $r_0$  и  $\varphi_0$  для заданного закона изменения  $\alpha(\varphi)$  (пояснения к формуле см. на рис.1).

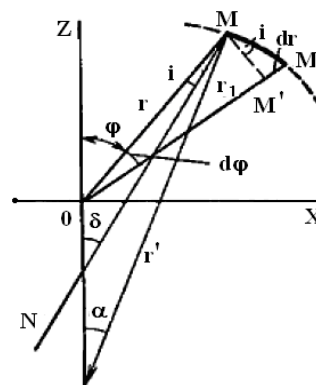


Рис. 1. Схема отражения лучей от поверхности [2]: О – точечный источник излучения;  $MM_1$  – участок кривой зеркального отражателя;  $r$ ,  $r_1$  – радиус-векторы потока излучения от источника;  $r'$  – луч отраженного потока излучения

Зависимость  $\alpha(\varphi)$  определяет правило распределения потока излучения по облучаемой поверхности. Если задано распределение потока излучения по облучаемой поверхности  $E(x)$ , то для отыскания зависимости  $\alpha(\varphi)$  находят зависимость координаты облучаемой поверхности  $x(\varphi)$  из интегрального уравнения нарастания потока для поверхности:

$$r_a \int_{\varphi_0}^{\varphi} J_{\varphi} d\varphi = \int_{x_0}^x E(x) dx, \quad (2)$$

где  $r_a$  – коэффициент отражения зеркальной поверхности;  $J_{\varphi}$  – поток излучения источника в направлении  $\varphi$ . При этом следует иметь ввиду, что  $E(x)$  – разность суммарного потока излучения и потока прямого из-

лучения от источника на облучаемую поверхность  $E_{ист.}(x)$ . Искомую функцию  $g(\varphi)$  определяют либо численным решением системы уравнений (1) и (2), либо, используя графоаналитические методы [3].

Модели, использующие решение уравнения Н.Г.Болдырева, являются оптико-геометрическими моделями, так как основаны на законах геометрической оптики (прямолинейного распространения излучения, полного отражения, закона Ламберта). Наиболее простые оптико-геометрические модели позволяют рассчитывать координаты отражающей поверхности для точечного источника излучения, тогда как в реальных системах источник имеет конечные размеры и сложную форму поверхности (например, нить лампы накаливания). Упрощающими допущениями этих моделей являются также отсутствие учета закона обратных квадратов для источника излучения и оптических свойств среды, через которую проходит поток излучения, что может приводить к ошибкам для систем, в которых пути лучей от источника к поверхности существенно отличаются по длине. Результатом расчета оптико-геометрических моделей является линия, представляющая собой, как правило, интерполяцию численного решения модели. Неточность положения точек линии между узлами интерполяции является еще одним источником погрешности решения задачи. Для анализа степени соответствия решения, полученного с помощью простой оптико-геометрической модели, заданному правилу распределения потока излучения по поверхности можно использовать тепловые модели излучения, основанные на решении интегральных уравнений переноса энергии излучения в оптически прозрачной рассеивающей, поглощающей и преломляющей среде [4]. В практике теплового моделирования получили распространение численные методы решения уравнения переноса, реализованные в конечно-элементных представлениях замкнутых систем лучистого теплообмена [5].

### Тепловой анализ инфракрасных систем

Рассмотрим примеры применения теплового анализа инфракрасных систем, содержащих один или два источника излучения, зеркально отражающие поверхности и одну или две плоские поверхности облучения (рис.2).

При проектировании профиля отражающей поверхности (зеркала) зададимся условиями: зеркало должно обеспечивать однократное отражение луча на пути от источника излучения к облучаемой поверхности, распределение интенсивности облучения по поверхности должно быть равномерным.

Для построения профилей отражающих поверхностей системы I используем оптико-геомет-

рическую модель, в которой линия поверхности облучения разбивается на равные по длине участки, для каждого из которых записывается условие равенства косинусов падения лучей от источника и от зеркала (см. рис.3а) [6]:

$$\cos(\gamma_i) + \cos(\alpha_i) = \cos(\alpha_0) = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – угол падения луча от источника излучения в точку поверхности облучения с координатой  $x=A$ ;  $i$  – номер участка поверхности облучения ( $i=1,2,\dots,n$ ).

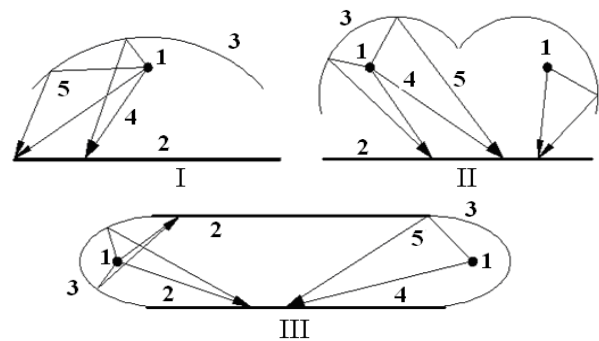


Рис. 2. Схемы рассматриваемых систем инфракрасного излучения:

- 1 – точечный источник излучения, 2 – поверхность облучения, 3 – отражающая поверхность,
- 4 – лучи прямого облучения;
- 5 – лучи отраженного облучения

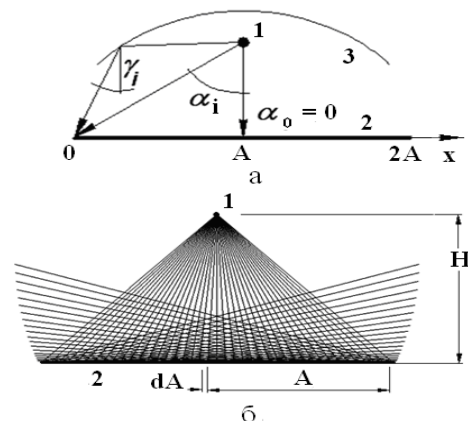


Рис. 3. Схема распределения отраженных лучей в системе I:

- 1 – точечный источник излучения, 2 – поверхность облучения, 3 – отражающая поверхность,
- 4 – лучи прямого облучения;
- 5 – лучи отраженного облучения

В соответствии с (3) на каждую точку поверхности облучения должен падать отраженный луч, например, так, как показано на рис.3б. Направление отраженных лучей позволяет построить линию зеркала от границы поверхности облучения. При этом каждый следующий участок линии зеркала будет отражать излучение на следующий участок поверхности облучения.

Координаты конца каждого участка линии зеркала  $x$ ,  $y$  находятся решением системы уравнений:

$$\begin{cases} y = \operatorname{tg}(\psi) \cdot (x - X_i) + Y_i; \\ y = \operatorname{tg}(\gamma) \cdot [x - (A + dA \cdot i)], \end{cases} \quad (4)$$

где  $\psi$  – угол между направлением линии зеркала и линией облучения;  $X_i, Y_i$  – координаты начала участка (конца предыдущего участка);  $A$  – полуширина поверхности облучения;  $i$  – номер участка ( $i = 1 \dots n$ ).

Угол  $\gamma$  отраженного луча вычисляется как

$$\gamma_i = \frac{\pi}{2} - \arccos \left( 1 - k_i \cdot \cos \left( \arctg \left( \frac{dA \cdot i}{H} \right) \right) \right), \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент учета закона обратных квадратов для источника излучения.

С использованием формул (4), (5) построим профили зеркал для случая излучения одного источника, расположенного на высоте  $H$  над плоской поверхностью облучения полушириной  $A$ . На рис.4а представлен результат построения профиля без учета закона обратных квадратов, а на рис.4б – профиль с учетом закона обратных квадратов. Профили построены таким образом, чтобы линия зеркала замкнулась над источником излучения, что позволит всю энергию излучения источника направить на облучаемую поверхность. Такая особенность построения привела к тому, что высота положения источника излучения оказалась различной для вычисления координат профиля на рис.4а и рис.4б.

Выполним тепловой анализ полученных систем инфракрасного излучения, для чего построим двумерные тепловые конечно-элементные модели лучисто-кондуктивно-конвективного теплопереноса, представленные дифференциальными уравнениями теплового баланса в условиях сложного теплообмена элементарного объема газовой среды и элементарных участков поверхности границы расчетной области, а также интегро-дифференциальными уравнениями переноса излучения через элементарный объем газовой среды [7, 8]. В качестве модели переноса излучения используем модель дискретных ординат, позволяющую описывать процесс переноса в поглощающих, излучающих и рассеивающих газовых средах как для «серого», так и для селективного представления излучения [9]. Решение уравнений теплового баланса выполним совместно с уравнениями движения газовой среды в поле массовых сил, что позволит учесть влияние среды на распределение температуры по поверхности источника излучения. Источник излучения и облучаемую поверхность зададим как серое тело со степенью черноты  $\epsilon = 1$ , поверхность зеркала как зеркально отражающую со степенью черноты  $\epsilon = 0$ . Условия теплообмена на внешних границах системы зададим как условия 3-го рода для естественно-конвективного теплообмена: температура окружающей среды – 300 К, коэффициент теплообмена на внешней стенке – 10 Вт/м<sup>2</sup>·К, степень черноты поверхности

внешней стенки поверхности облучения – 1, зеркала – 0. Параметры дискретизации модели (дискретизация сетки конечных элементов, угловая и пиксельная дискретизация модели дискретных ординат для описания переноса излучения) установим в соответствии с результатами, полученными в [10]: шаг сетки конечных элементов  $dx = 1 \dots 2$  мм; величина угловой дискретизации  $\varphi d = 20$ ; значение параметра пикселизации  $\varphi r = 3$ . Указанные параметры моделей используем также для анализа систем II и III.

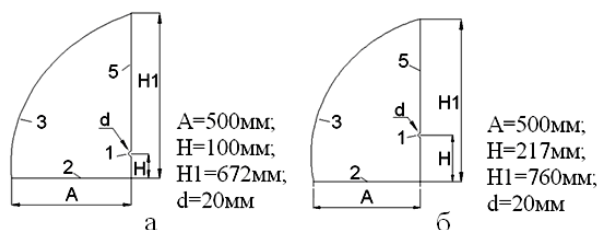


Рис. 4. Расчетные профили зеркал

Результаты теплового моделирования для мощности источника излучения  $Q = 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> приведены на рис.5.

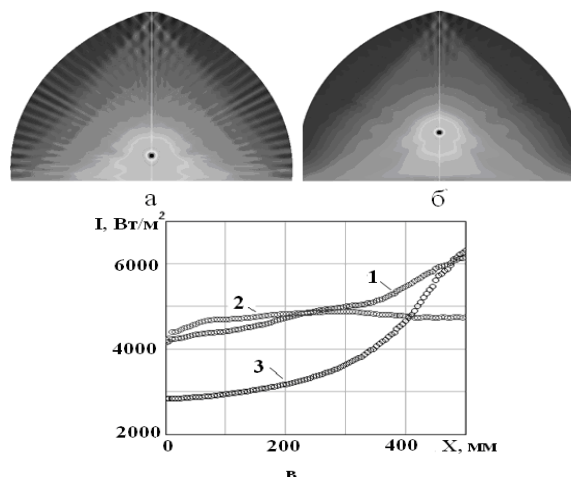


Рис. 5. Результаты теплового анализа модели системы I: а – поле излучения системы по рис.4, а; б – поле излучения по рис.4 б; в – распределение потока излучения  $I(x)$ . 1 – схема по рис. 4 а; 2 – схема по рис. 4 б; 3 – при отсутствии зеркала

Для сравнения на диаграмме приведена кривая распределения потока излучения (кривая 3 на рис.5в) по поверхности облучения для случая отсутствия зеркала при  $Q = 2 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Для оценки степени неравномерности распределения потока излучения  $I(x)$  определим максимальное нормированное отклонение распределения по облучаемой поверхности  $\delta I$ :

$$\delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_m} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где  $I_{\max}$  – наибольшее значение потока,  $I_{\min}$  – наименьшее значение потока,  $I_m$  – среднее значение потока на поверхности.

В табл. 1 приведены  $I_m$  и  $\delta I$  полученных распределений потока излучения.

Таблица 1  
Показатели неравномерности распределения потока излучения

Вариант*	$I_m, \text{Вт/м}^2$	$\delta I, \%$
1	4984	35,2
2	4731	7,4
3	3983	85,9

\* - номера вариантов соответствуют обозначениям на рис. 5

Полученные с помощью тепловой модели распределения потока излучения по поверхности облучения показывают, что примененная оптико-геометрическая модель позволила построить профили зеркала, обеспечившие существенное улучшение равномерности по сравнению с облучением поверхности источником без зеркала. Учет закона обратных квадратов позволяет «строить» линию зеркала с большей степенью соответствия заданному условию. Однако идеальную прямую распределения потока излучения получить не удалось из-за конечного размера источника излучения, погрешностей вычислений и построений линии зеркала. Для повышения степени равномерности можно либо усложнять оптико-геометрическую модель, например, вводя в нее учет размеров источника излучения, либо корректировать полученный профиль зеркала.

Рассмотрим излучение двух источников на плоскую поверхность (система II). Источники расположим симметрично относительно центра поверхности на одинаковой высоте (см. рис.6). Отраженные лучи построим для левой половины поверхности как результат отражения от левого источника, а для правой – правого.

Для построения линии зеркала система уравнений (4) примет вид:

$$\begin{cases} y = \text{tg}(\psi) \cdot (x - X_i) + Y_i; \\ y = \text{tg}(\gamma) \cdot |x - dA \cdot i|. \end{cases} \quad (7)$$

В соответствии с правилом (3) угол  $\gamma_i$  отраженного луча:

$$\gamma_{i+1} = \pi/2 - \arccos(\max(I) - I_i), \quad (8)$$

где  $\max(I)$  – максимальное значение доли падающего излучения.

Долю падающего излучения на  $i$ -й участок линии облучения определяем как сумму

$$I_i = I_i^1 + I_i^2, \quad (9)$$

где доля излучения от  $J$ -го источника  $I_i^J$  определяется формулой:

$$I_i^J = N / \sqrt{H^2 + (X_c^J - dA_i \cdot i)^2}, \quad (10)$$

$X_c^J$  – горизонтальная координата положения источника излучения.

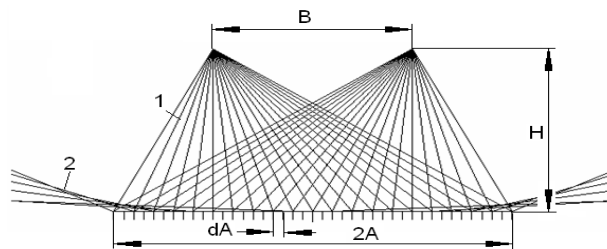


Рис. 6. Два точечных источника над поверхностью:  
1 – лучи прямого облучения;  
2 – лучи отраженного облучения

При увеличении расстояния между источниками до величин, превышающих ширину поверхности облучения, формулы (7) – (10) позволяют построить линии зеркала, направляющие весь поток излучения от источника на поверхность и исключая взаимное облучение источников и зеркал (см. рис.7). Линии 4 на рис. 7 обозначают граничное положение луча от источника, задаваемое кромкой зеркала 3. На рис.8 и в табл. 2 представлены результаты теплового анализа рассмотренной системы для мощности источника излучения  $Q = 10^4 \text{Вт/м}^2$ .

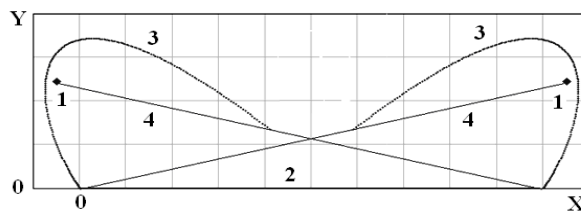


Рис. 7. Кривые зеркала при  $B \geq 2A$

Кривая 1 – результат анализа профиля зеркала, построенного без учета закона обратных квадратов; кривая 2 – с учетом закона; кривая 3 – для профиля зеркала, полученного усреднением профилей с учетом и без учета закона обратных квадратов. Кривая 4 – распределение потока излучения и теплового потока для системы без зеркал. Данные табл. 2 и рис.8в содержат результаты расчета теплового потока в облучаемую стенку, определяющего интенсивность ее разогрева или интенсивность процесса испарения влаги в процессе сушки.

Таблица 2

Показатели распределения теплового потока

Вариант*	$q_m, \text{Вт/м}^2$	$\delta q, \%$
1	546	55,6
2	545	19,1
3	544	24,2
4	509,6	125,5

\* – номера вариантов соответствуют обозначениям на рис. 8

Результаты теплового анализа системы излучения двух источников показывают, что оптико-геометрическая модель позволяет получить профили зеркала отражателя, обеспечивающие существ-

венное выравнивание распределения потока излучения по поверхности облучения. Наилучшие показатели равномерности у профиля зеркала, полученного с учетом закона обратных квадратов.

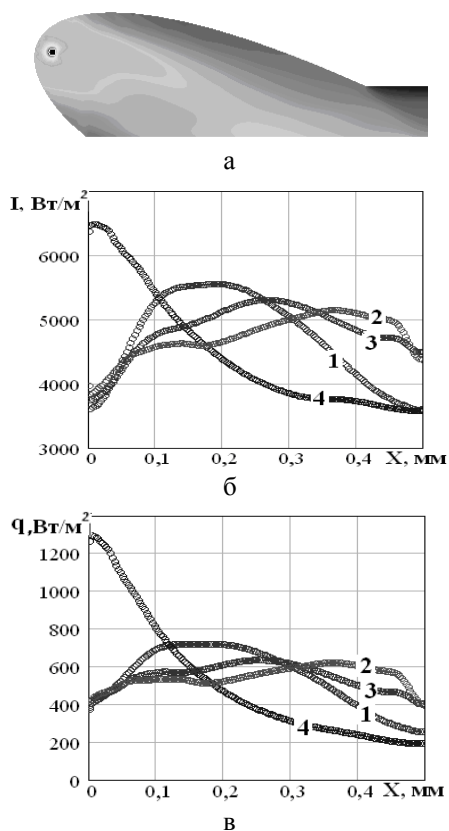


Рис. 8. Результаты теплового анализа модели системы II: а – поле потока излучения; б – распределение потока излучения; в – распределение теплового потока в облучаемую поверхность. 1 – профиль зеркала без учета закона обратных квадратов; 2 – с учетом закона обратных квадратов; кривая 3 – усреднение профилей с учетом и без учета закона обратных квадратов; 4 – без зеркал

Рассмотрим систему III излучения двух источников на две параллельные поверхности. Источники вынесем за пределы поверхностей (рис. 9).

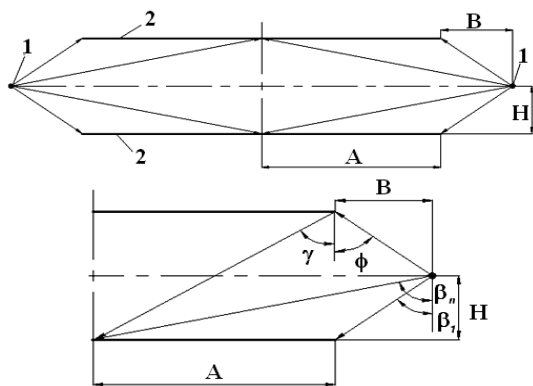


Рис. 9. Схема размещения источников излучения системы III

Профиль зеркала построим для случая распределения отраженного излучения на половину поверхности (до оси симметрии системы). Тогда предельное значение угла  $\gamma$  (см. рис.9):

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{2 \cdot H}{A - dA/2}\right). \quad (11)$$

В соответствии с условием (3) решаем уравнение  $\cos(\beta_1) = \cos(\beta_n) + \cos(\gamma)$  относительно горизонтальной координаты X в виде

$$\begin{aligned} \cos\left(\arctg\left(\frac{X + dA/2}{H}\right)\right) &= \\ = \cos\left(\arctg\left(\frac{X + dA/2 + dA \cdot n}{H}\right)\right) + \cos(\gamma). \end{aligned} \quad (12)$$

Корень X уравнения (12) есть величина B удаления источника от края поверхности. Координаты положения источника определим как  $X_c = A+B$ ,  $Y_c = H$ . Теперь для координат точки начала линии зеркала  $X_0 = A$  и  $Y_0 = 2 \cdot H$  и угла отраженного луча  $\gamma_0 = \gamma$  вычисляем углы:

- угол  $\phi$  между лучом от источника ( $X_c, Y_c$ ) к точке ( $X_i, Y_i$ ) и вертикалью

$$\phi_i = \arctg\left(\frac{X_c - X_i}{Y_i - Y_c}\right), (i = 0..n = A/dA); \quad (13)$$

- угол между направлением линии зеркала и линией облучения  $\psi$

$$\psi_i = \left(\frac{\gamma_i - \phi_i}{2}\right), (i = 0..n);$$

$$\psi_i = \left(\frac{\pi + \phi_i - \gamma_i}{2}\right), (i = 0..n), \text{ если } Y_i < H. \quad (14)$$

Находим точку пересечения линии отраженного луча, исходящего из точки отрезка прямой облучения с координатами  $X = X_i + (A+i \cdot dA)$  и  $Y = 0$ , и линией зеркала, исходящей из точки с координатами  $X_i, Y_i$ , решением системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} y = \text{tg}(-\psi) \cdot (x - X_i) + Y_i; \\ y = \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \cdot (x - dA \cdot i). \end{cases} \quad (15)$$

Вычисляем угол  $\gamma_i$  следующего отраженного луча:

$$\begin{aligned} \gamma_{i+1} &= \\ = \arccos\left(1 - \cos\left(\arctg\left(\frac{B + dA \cdot (n - i + 1) - dA/2}{H}\right)\right)\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Формулы (13) – (16) позволяют рассчитать профиль зеркала, пример такого расчета представлен на рис. 10, а.

Упрощающими допущениями выполненными построений дополнительно к допущениям, указанным ранее, являются отсутствие учета излучения источника излучения на поверхность за вертикальной линией симметрии рассматриваемой схемы. Не

учтено также отраженное излучение источника, противоположного к рассматриваемому зеркалу. Недостатком изображенной на рис. 10а линии зеркала является ее несимметричность относительно горизонтальной оси симметрии рассматриваемой системы излучения. Частью линии под осью симметрии пренебрежем, а результирующую линию отражателя получим зеркальным отражением части линии зеркала, размещенной над осью симметрии (рис. 10, б).

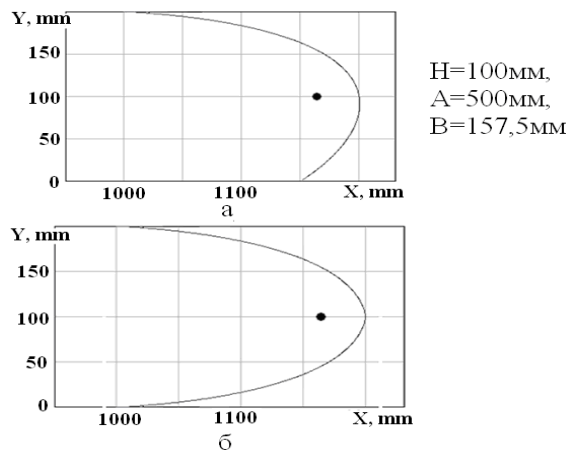


Рис. 10. Линия зеркала для системы III

Выполним тепловой анализ системы с отражателями, имеющими форму, представленную на рис. 10б. На рис. 11 и в табл. 3 представлены распределения потока излучения  $I(x)$  и теплового потока  $q(x)$  по облучаемым поверхностям системы III для мощности источника излучения  $Q = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ .

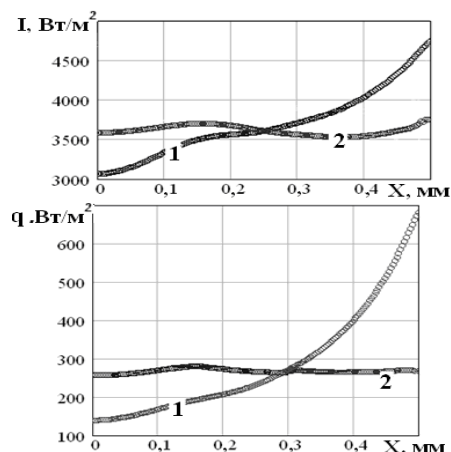


Рис. 11. Результаты теплового анализа модели системы III: 1 – распределение для источников без отражателей; 2 – распределение для источников с отражателями, имеющими форму в соответствии с рис. 10, б

Результаты теплового анализа показывают, что как и для двух выше рассмотренных систем, оптико-геометрическая модель позволяет создавать замкнутые системы инфракрасного теплообмена с зеркаль-

но отражающими поверхностями, обеспечивающие существенное выравнивание распределения потока излучения по поверхности облучения. Степень неравномерности для рассмотренных систем инфракрасного нагрева снизилась с 85...125% при отсутствии отражателей до 7...19% при применении зеркальных отражателей. Для достижения более высоких показателей равномерности распределения необходимо использовать оптико-геометрические модели, учитывающие конечные размеры источников излучения и выполняющие расчет линии зеркала с помощью более точных методов.

Таблица 3

Показатели равномерности распределения теплового потока

Вариант*	$q_m, \text{ Вт/м}^2$	$\delta q, \%$
1	286	96,7
2	281	9,4

\* – номера вариантов соответствуют обозначениям на рис. 11

Альтернативным уточнению линии зеркала применением более сложной оптико-геометрической модели является способ, предусматривающий коррекцию профиля отражающей поверхности, полученного с помощью простой оптико-геометрической модели. Коррекция может быть выполнена последовательными шагами изменений исходного профиля и теплового анализа скорректированного профиля. Для выполнения таких изменений следует установить взаимосвязь положения участков поверхности отражения и характера неравномерности распределения потока излучения по поверхности облучения.

## Заключение

Рассмотрены оптико-геометрические модели проектирования систем равномерного инфракрасного облучения плоских поверхностей и тепловые модели анализа этих систем. В качестве тепловых моделей использованы дискретные представления уравнений переноса излучения в оптически прозрачных рассеивающих, преломляющих и излучающих средах и уравнений конвективного тепло- и массопереноса. Использование тепловых моделей позволяет оценить соответствие решения оптико-геометрической модели заданному распределению потока излучения по поверхности облучения. Предложен способ повышения равномерности облучения последовательной коррекцией геометрической формы зеркально отражающих элементов систем с использованием тепловой модели излучения.

Рассмотренные модели могут быть использованы при проектировании систем инфракрасной сушки лакокрасочных покрытий плоских поверхностей.

## Литература

1. Лакокрасочные покрытия. Технологии и оборудование [Текст]: справ. изд. / А.М. Елисаветский, В.Н. Ратников, В.Г. Дорошенко и др.; под ред. А.М. Елисаветского. – М.: Химия, 1992. – 416 с.

2. Трембач, В.В. Световые приборы [Текст]: учеб. для вузов. / В.В. Трембач. – М.: Высш. шк., 1990. – 463 с.

3. Блох, А.Г. Теплообмен излучением [Текст]: справ. / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

4. Суржиков, С.Т. Вычислительный эксперимент в построении радиационных моделей излучающего газа [Текст] / С.Т. Суржиков. – М.: Наука, 1992. – 157 с.

5. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов теплопереноса [Текст]: учеб. для вузов / В.С. Швыдкий, Н.А. Спиринов, М.Г. Ладыгичев, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон. – М.: Интернет Инжиниринг, 1999. – 520 с.

6. Завалий, А.А. Оптико-геометрические модели проектирования отражающих поверхностей

устройств инфракрасной сушки [Текст] / А.А. Завалий // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – 2011. – Vol. 13. – С. 150–158.

7. Fluent 6.1. [Text]: User's Guide. Fluent Inc. 2003. – Vol. 1–3.

8. Завалий, А.А. Влияние формы отражающих поверхностей на равномерность облучения продукта сушки в инфракрасной сушильной камере [Текст] / А.А. Завалий, И.В. Янович // Пищевая наука и технология: сб. научн. тр. – Одесса: Одесская национальная академия пищевых технологий. – 2010. – № 4. – С. 91–95.

9. The Discrete Ordinates (DO) Radiation Model. Radiative Heat Transfer. Modeling Heat Transfer. Fluent 6.0 manual [Text] // Help for Fluent 6.1 package. Fluent Inc. – 2001. – Vol. 11. – P. 14–15.

10. Завалий, А.А. Оптимизация параметров дискретизации при моделировании систем инфракрасного нагрева методом конечных элементов [Текст] / А.А. Завалий, И.В. Янович // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – Simferopol-Lublin, 2010. – Vol 12D. – С. 201–211.

Поступила в редакцию 23.11.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции АД Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## КОМП'ЮТЕРНЕ ТЕПЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ІНФРАЧЕРВОНИХ СИСТЕМ РІВНОМІРНОГО ОПРОМІНЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

*О.О. Завалій*

Розглянуто системи інфрачервоного нагріву, що містять один або два джерела випромінювання, дзеркально відбиваючі поверхні і одну або дві плоскі поверхні опромінення. З використанням оптико-геометричних моделей побудовані поверхні дзеркального відбивання, що забезпечують рівномірний нагрів поверхонь опромінення. На основі чисельного рішення інтегральних рівнянь переносу енергії випромінювання в оптично прозорому середовищі розроблені моделі аналізу теплового стану розглянутих систем. Виконаний аналіз теплового стану систем інфрачервоного нагріву показав, що прості оптико-геометричні моделі дозволяють створювати замкнуті системи інфрачервоного теплообміну з дзеркально відбиваючими поверхнями, що забезпечують суттєве вирівнювання розподілу потоку випромінювання по поверхні опромінення. Для підвищення ступеня рівномірності опромінення можливе застосування послідовної корекції геометричної форми дзеркально відбиваючих елементів систем, що полягає в зміні положення часток поверхонь дзеркального відбивання і теплового аналізу модифікованої системи.

**Ключові слова:** теплове моделювання, інфрачервоний нагрів, дзеркально відбиваючі поверхні.

## COMPUTER MODELING AND ANALYSIS OF THERMAL INFRARED SYSTEMS UNIFORM IRRADIATION FLAT SURFACES

*A.A. Zavaliiy*

Examined the systems of infrared heating, containing one or two sources of radiation, specular reflecting surfaces and one or two flat surfaces of irradiation. With the use of optical-geometric models are constructed surface mirroring to ensure uniform heating of the surface exposure. Based on the numerical solution of integral equations of energy transfer radiation in an optically transparent medium developed models of the thermal analysis of state of the systems. The analysis of the thermal state of the infra-red heating systems has shown that a simple geometric-optical models allow us to create a closed system of infrared heat themes with mirror reflective surfaces that provide substantially the alignment distribution of the radiation flux on the surface of the irradiation. To increase the uniformity of exposure is possible to use a consistent correction of geometric shapes mirror reflective element system, which consists in changing the position of teaching-stkov specular surfaces and thermal analysis of the modified system.

**Key words:** thermal modelling and infrared heating, mirror reflecting surface.

**Завалий Алексей Алексеевич** – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технологического оборудования перерабатывающих предприятий и инженерной механики Южного филиала Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Крымский агротехнологический университет», Симферополь, Украина.