

---

## СИСТЕМА ИНФРАКРАСНОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ

Алексей Завалий, Иван Янович

Южный филиал Национального университета биоресурсов и природопользования Украины  
«Крымский агротехнологический университет».

**Аннотация.** Разработана методика проектирования систем инфракрасного облучения, обеспечивающих равномерный нагрев поверхностей. Система включает в себя линейные источники инфракрасного излучения, окруженные отражающими и теньевыми поверхностями. Равномерность нагрева обеспечивается взаимным расположением поверхностей, элементов системы, а также формой и оптическими свойствами отражающих и теньевых поверхностей. Приведены примеры применения систем в устройствах инфракрасной сушки.

**Ключевые слова:** инфракрасное излучение, сушка, нагрев, отражающие поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных недостатков систем инфракрасного нагрева является высокая степень неравномерности теплового потока излучения, падающего на облучаемую поверхность [1].

Система инфракрасного нагрева – это совокупность источников инфракрасного излучения, отражающих и поглощающих поверхностей, а также их взаимного расположения.

Целью работы является разработка метода проектирования систем инфракрасного облучения, которые обеспечивают равномерный нагрев поверхностей.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наибольшее распространение получила система, в которой источники излучения размещаются над поверхностью нагрева (рис.1, а). Недостатками системы нагрева является неравномерное облучение поверхности нагрева и низкий КПД из-за локального перегрева облучаемой поверхности. Неравномерность обусловлена малыми геометрическими размерами точечных источников излучения по отношению к облучаемой поверхности. Для выравнивания теплового воздействия на поверхность применяют технические решения, увеличивающие площадь поверхности источника излучения - используют источники излучения больших физических размеров, большое количество источников малого размера, источники с отражателями [1, 2, 3]. Примером использования такой системы может быть устройство сушки лакокрасочных покрытий (рис.1б).

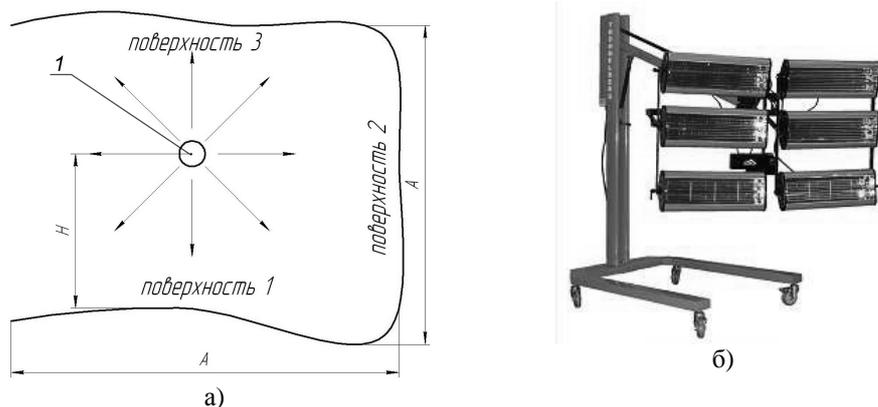


Рис. 1. Схема системы инфракрасного нагрева (а) и устройство для инфракрасной сушки лакокрасочных покрытий (б). 1 – источник инфракрасного излучения

Fig. 1. Scheme of infrared heating (a) and a device for infrared drying paints (b).

Предложена система ИК нагрева, в которой источники излучения вынесены за пределы поверхности нагрева (рис.2). Для распределения теплового потока по поверхности нагрева источники излучения оснащены зеркальными отражателями.

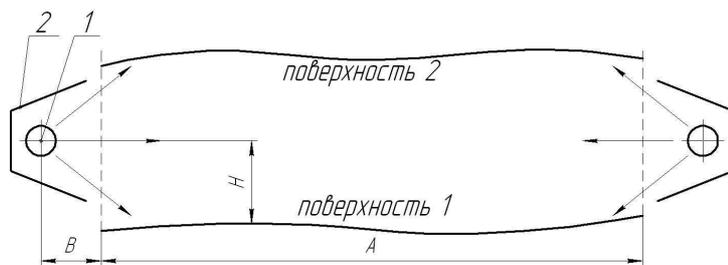


Рис. 2. Схема системы инфракрасного нагрева: 1 – источник инфракрасного излучения, 2 – отражающая поверхность

Fig. 2. Scheme of infrared heating

Такая компоновка системы позволяет осуществлять равномерный нагрев поверхности. Это стало возможным, благодаря разработанному нами методу проектирования профиля отражателя, который равномерно распределяет тепловое излучение в системе заданной геометрии.

Метод включает в себя:

1. построение геометрии системы;
2. построение профиля отражателя с использованием тепловой и оптической моделей системы нагрева;
3. построение расчетных полей температуры и теплового потока для двух- и трехмерной моделей системы.

Приведем пример использования методики для случая проектирования сушильных устройств инфракрасного нагрева. Сушильное устройство представляет собой

камеру, рабочим объемом  $2\text{ м}^3$  (рис.3). В камере на расстоянии 200мм друг от друга установлены сетчатые лотки размером 900х850мм. Каждый лоток облучается двумя излучателями, содержащими по 3 лампы накаливания J78 мощностью 150Вт. Для распределения теплового потока по поверхности лотка излучатели оснащены отражателями.

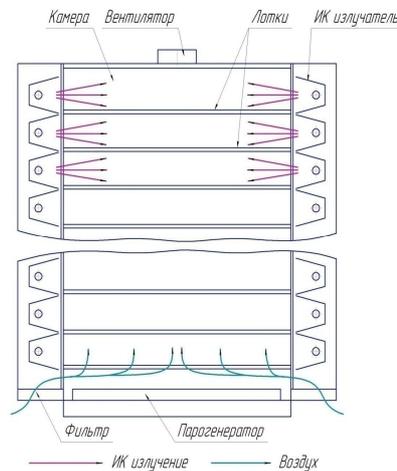


Рис. 3. Схема инфракрасной сушильной камеры

Fig. 3. Scheme infrared drying chamber

### ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проектирования формы отражателей использована оптическая модель системы нагрева. На схеме (рис.4а) указаны направления лучей, испускаемых источником излучения, и отраженных в соответствии с законом полного отражения [4].

Интенсивность излучения от источника малых размеров на элементарную площадку поверхности может быть определена по формуле [3]:

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \frac{\cos \varphi}{\pi} d\omega \quad , \quad (1)$$

где:  $I_0$  – интенсивность излучения источника в направлении, ортогональном поверхности,  $\varphi$  - угол между нормалью от источника к поверхности и вектором излучения,  $d\omega$  - телесный угол видимости элементарной площадки точечным источником.

Из формулы 1 следует что, чем больше угол падения и чем больше лучей падает на элементарный участок поверхности нагрева, тем больший поток излучения поступает на данную площадку. В случае зеркального отражения, каждый участок отражающей поверхности направляет поток излучения на конкретный участок поверхности нагрева.

Установить связь между участками отражателя и поверхности нагрева позволяет модель, в которой поверхность отражателя разбита на зоны (рис. 5б).

Поворотом зоны вокруг своего геометрического центра добиваемся выполнения условия равенства тепловых потоков, падающих на элементарную площадку поверхности от источника излучения и отражателя.

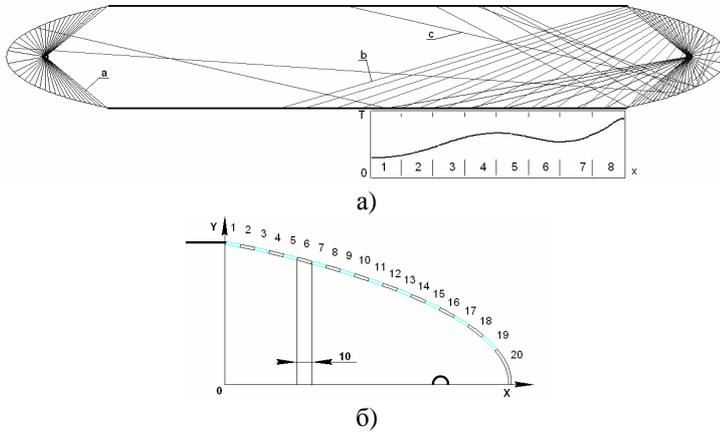


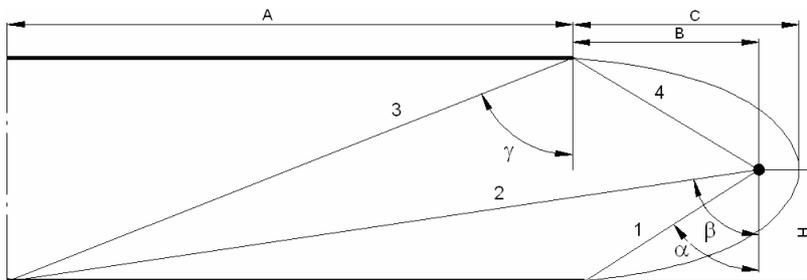
Рис.4. Оптическая модель системы нагрева:  
а – лучи источника излучения; б – лучи первого отражения; с – лучи двойного отражения

Fig.4. Optical model of heating

Равенство выполняется при условии, следующем из уравнения (1):

$$\cos(\beta) + \cos(\gamma) = \cos(\alpha), \quad (2)$$

где:  $\alpha$  - наибольший угол падения излучения от источника на край поверхности,  $\beta$  - угол падения излучения от источника на элемент поверхности;  $\gamma$  - угол падения излучения от излучателя на элемент поверхности (рис.5).



- 1 – луч, падающий от источника на край лотка;
- 2 – луч, падающий от источника на середину лотка;
- 3 – луч, падающий от отражателя на середину лотка

Рис.5. Схема построения «изотермического» профиля

Fig.5. Diagram of "isothermal" profile

Условие (2) удовлетворяет требования равномерности, если поток излучения от источника попадает только на половину принимающей поверхности. Задающим значением условия является значение  $\cos(\alpha)$  для точки края поверхности.

Выражение (2) позволяет также определять геометрические размеры межлоточного пространства (А, В, С, Н на рис.6), обеспечивающие возможность построения «изотермического» профиля, задавая, например, величины А и Н.

Качество полученной геометрической формы отражателя проверяем тепловой моделью системы нагрева, образованной диффузно-серыми поглощающими поверхностями лотков и серыми зеркально отражающими поверхностями отражателей. Для трехмерного представления внутреннее пространство расчетной области замыкается боковыми стенками. Для двумерного представления принимается допущение о бесконечной длине поверхностей. Внутри области размещены два линейных источника излучения цилиндрической формы, размещенные вдоль поверхностей. Внутренняя область заполнена газообразной средой. Тепловая модель включает в себя стационарные уравнения теплового баланса элементов системы. Решение уравнений получаем численно методом конечных элементов [5].

Количественными критериями оценки качества формы отражателя приняты максимальная нормированная разность температур на принимающей излучение поверхности  $\Delta t_{\max}$ :

$$\Delta t_{\max} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\text{mean}}} \cdot 100,$$

где:  $t_{\max}$  – наибольшее значение температуры на поверхности,  $t_{\min}$  – наименьшее значение температуры на поверхности,  $t_{\text{mean}}$  – среднее значение температуры на поверхности; а также дисперсия значения температуры на принимающей излучение поверхности:  $\sigma^2$ .

Оптическая и тепловая модели хорошо согласуются в части направления потоков излучения от поверхности отражателя. На рис. 6 приведено поле радиационных потоков при «выключении» зоны 15.

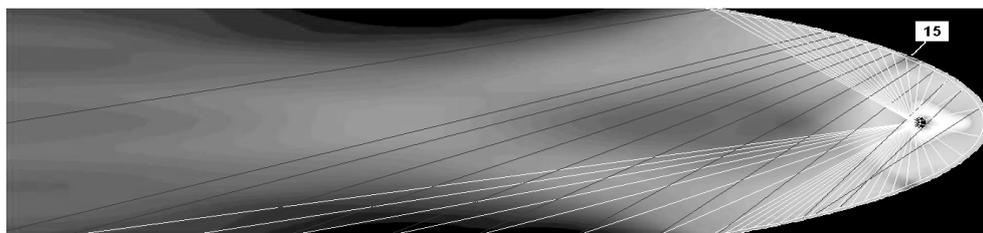


Рис. 6. Поле радиационных потоков при «выключении» зоны 15

Fig.6. Diagram of "isothermal" profile

«Выключение» означает, что в ходе моделирования процесса теплообмена для интересующей зоны задавались следующие параметры: степень черноты  $\epsilon = 1$ ,

температура поверхности зоны  $T = 300\text{K}$ . То есть зона «выключалась» из решения задачи теплопереноса, так как не отражала падающее излучение и не излучала свое вследствие того, что ее температура равна температуре окружающей расчетную область среды. Все остальные зоны отражателя описывались как полностью зеркально отражающие ( $\epsilon=0$ ). Результат «выключения» зоны виден затемненной полосой изображения, отходящей от зоны 15. На изображение поля радиационных потоков наложены линии лучей в соответствии с оптической моделью.

Результат построения «изотермического» профиля приведен на рис.7 а. На рис.7б и 7в представлены поля температуры на поверхности нагрева для двумерной (2D) и трехмерной (3D) задач, которые достаточно хорошо согласуются друг с другом. Параметры неравномерности для «изотермического» профиля составили  $\Delta t_{\max}=0,604\%$  и  $\sigma t^2=0,338$ .

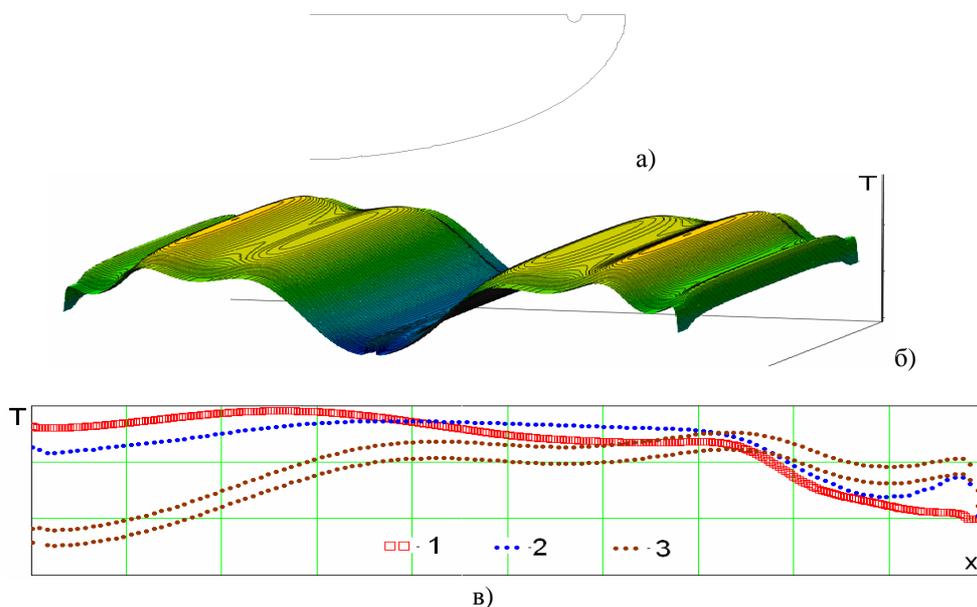


Рис.7. 3D-поле температуры для «изотермического» профиля:

- 1– 2D-поле температуры, сетка 1мм; 2 – 2D-поле температуры, сетка 4мм;  
3– 3D-поле температуры, сетка 4мм

Fig.7. 3D-temperature field for the "isothermal" profile

## ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный метод проектирования систем инфракрасного нагрева позволяет получать высокую равномерность температур на поверхности нагрева. Метод обеспечивает возможность построения «изотермического» профиля отражающей поверхности для поверхности нагрева произвольной формы при выполнении условия (2).

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Перевод с английского. М: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970. – 856с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. Пер с англ. М.: Мир, 1975. – 934с.
3. Завалий А.А., Янович И.В. Анализ схем излучатель-отражатель для установок инфракрасной сушки продуктов питания// Энергосберегающие технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции (технические науки): Сборник научных работ Крымского государственного аграрного университета.- Выпуск №93.- Симферополь 2006, с. 80-86.
4. Орлов В.М. Генераторы лучистой мощности. Ленинград: Ленинградский электротехнический институт, 1960. - 280с.
5. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. М.: Госэнергоиздат, 1955. – 229с.

## SYSTEM OF INFRA-RED ISOTHERMAL HEATING OF A SURFACE.

Alexey Zavalij, Ivan Janovich

**Summary.** The technique of designing of systems of the infra-red irradiation providing uniform heating of surfaces is developed. The system includes the linear sources of infra-red radiation surrounded with reflecting and shadow surfaces. Uniformity of heating is provided with a relative positioning of surfaces, elements of system, and also the form and optical properties of reflecting and shadow surfaces. Examples of application of systems in devices of infra-red drying are resulted.

**Key words:** infrared radiation, drying, heating, reflecting surface.