

УДК 535-1:631.365:004.942

## СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛЕЙ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА УСТРОЙСТВА ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ

*Завалий А. А*

*ЮФ НУБиП Украины "Крымский агротехнологический университет"*

*Zavaliy A.*

*The south branch of the national university of life and environmental sciences of ukraine  
"Crimean agrotechnological university"*

**Аннотация:** рассматриваются схемы устройств инфракрасной сушки продукции сельскохозяйственного производства, в которых с целью повышения объемной производительности, снижения тепловых потерь и повышения степени равномерности сушки используется целенаправленное распределение отраженного теплового излучения высокотемпературных источников.

Разработан метод создания рабочего объема устройств инфракрасной сушки, использующих преимущественно зеркально отраженное тепловое излучение. Метод основан на совместном использовании оптико-геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена в оптически прозрачных средах. Разработаны оптико-геометрические модели для определения геометрии отражающих поверхностей и тепловые модели лучистого теплообмена в устройствах инфракрасной сушки для анализа распределения потока теплового излучения на поверхности продукта сушки. Установлена корреляционная связь между результатами моделирования лучистого теплообмена в устройствах инфракрасной сушки с применением оптико-геометрических и тепловых моделей переноса лучистой энергии. Наличие тесной корреляционной связи позволяет выполнять коррекцию профилей отражающих поверхностей, полученных с использованием оптико-геометрической модели, по результатам анализа, выполненного с использованием тепловой модели лучистого теплопереноса.

Совместное использование оптико-геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена позволяет разрабатывать рабочие объемы устройств инфракрасной сушки с заданной степенью равномерности распределения потока излучения по поверхности продукта сушки в устройствах камерного и конвейерного типов.

**Ключевые слова:** инфракрасный, сушка, оптико-геометрическая модель, тепловая модель, корреляция.

### **Постановка проблемы**

Инфракрасная сушка является перспективным способом переработки продукции сельскохозяйственного производства, так как обеспечивает длительное сохранение максимального количества биологически ценных компонент и структуры свежих продуктов растениеводства и животноводства. Простота реализации инфракрасной сушки в компактных устройствах камерного и конвейерного типов дает возможность осуществлять переработку сельскохозяйственного сырья в условиях аграрных предприятий, снижая тем самым их зависимость от предприятий перерабатывающей промышленности и торговли. Основными задачами повышения эффективности устройств инфракрасной сушки продукции сельскохозяйственного производства являются увеличение объемной производительности, снижение тепловых потерь и обеспечение равномерности сушки.

### *Анализ исследований и публикаций*

В камерных и конвейерных устройствах инфракрасной сушки, где сырье размещается на поверхностях лотков камер или ленте конвейера, поверхности продукта сушки плоские, а распределение по ним потока излучения от источников существенно неравномерное [1]. Неравномерность обусловлена размещением источников излучения непосредственно над поверхностью сушки. Она может быть уменьшена увеличением расстояния от источника до поверхности, что приведет к снижению объемной производительности устройства, или увеличением количества источников над поверхностью, что приведет к перегреву термочувствительного сельскохозяйственного сырья. Уменьшение неравномерности потока излучения возможно также уменьшением температуры источников излучения. В этом случае источники излучения становятся комбинированными источниками конвективного и лучистого нагрева, что приведет к росту тепловых потерь устройства.

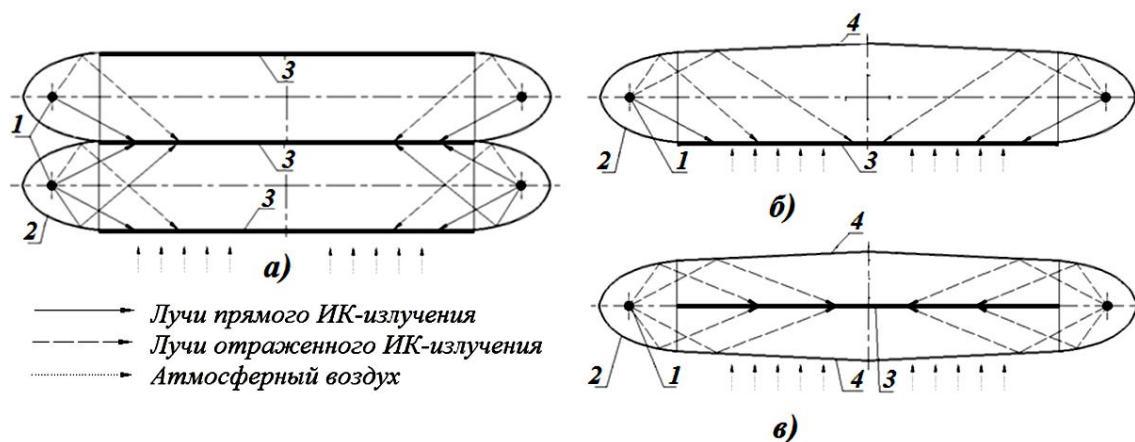
Одним из способов повышения эффективности устройств инфракрасной сушки является целенаправленное перераспределение теплового излучения от его источников. Средства такого перераспределения - взаимное положение источников излучения и продукта сушки, а также форма и расположение отражателей излучения. Поверхности источников излучения, отражателей и продукта сушки образуют рабочий объем устройства инфракрасной сушки, различные формы и размеры которого позволяют создавать различные распределения потока теплового излучения по поверхности продукта сушки. Существенную роль в распределении потока излучения играют местоположение и форма и зеркально отражающих поверхностей.

Таким образом, резервом повышения эффективности устройств инфракрасной сушки является возможность управления потоками отраженного излучения на поверхность сушки. В этом случае доля прямого излучения должна быть уменьшена, а доля отраженного излучения увеличена. Для минимизации тепловых потерь такие устройства должны обеспечивать однократное отражение прямого излучения, так как каждое отражение сопровождается поглощением части лучистой энергии отражающей поверхностью [2].

Схемы рабочих объемов устройств инфракрасной сушки, в которых поток излучения на поверхность сушки является преимущественно или полностью отраженным, приведены на рис.1 [3, 4]. Размещение в рабочих объемах источников излучения за боковыми границами поверхности продукта сушки позволяет существенно уменьшить расстояние между лотками в камерных устройствах, что обеспечивает их объемную производительность, близкую к конвективным устройствам. Равномерное распределение потока излучения по поверхности продукта сушки обеспечивается зеркально отражающими профилированными поверхностями боковых, верхних и нижних зеркальных отражателей. Для этих схем разработаны профили зеркально отражающих поверхностей, задачей которых является равномерное распределение потока теплового излучения по поверхности сушки.

Основой проектирования профиля отражающей поверхности являются представления геометрической оптики о распространении излучения, а координаты профиля для точечного источника можно получить, используя решение уравнения Н.Г.Болдырева [5], задающего перераспределение потока излучения источника в пространстве. Для анализа распределения потока излучения используют тепловые модели излучения, основанные на решении интегральных уравнений переноса энергии излучения в оптически прозрачной рассеивающей, поглощающей и преломляющей среде [6].

Таким образом, построение профиля отражающей поверхности осуществляется с помощью оптико-геометрической модели, а анализ результата построения – с помощью тепловой модели распространения излучения в пространстве.



**Рис. 1. Схемы устройств инфракрасной сушки**

**а) – многоярусная схема; б) одноярусная схема с облучением одной поверхности; в) одноярусная схема с облучением двух поверхностей; 1 – источник инфракрасного излучения; 2 – боковой профилированный зеркальный отражатель; 3 – сетчатый лоток для размещения продукта сушки; 4 – верхний и нижний зеркальные отражатели**

**Целью** настоящей работы является разработка метода создания рабочего объема устройства инфракрасной сушки, основанного на совместном использовании оптико-геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена.

Суть совместного использования моделей заключается в возможности коррекции геометрии отражающей поверхности, полученной с помощью оптико-геометрической модели, по результатам анализа распределения потока излучения по поверхности сушки, выполненного с помощью тепловой модели. Такая коррекция возможна при условии, что величина потока падающего излучения на заданный участок поверхности сушки тесно связана с положением определенного участка отражающей поверхности, то есть между результатами оптико-геометрического и теплового моделирования должна существовать тесная корреляционная связь. Наличие тесной корреляционной связи результатов моделирования позволит устанавливать участки отражающей поверхности, положение которых следует изменять для повышения степени равномерности распределения лучистого теплового потока. При этом возможно также определение коэффициентов влияния положения участка отражающей поверхности на распределение теплового потока по поверхности облучения.

Для проектирования зеркально отражающей поверхности инфракрасного излучателя мы используем оптико-геометрические модели в двумерной постановке для однократного отражения от зеркальной поверхности, которые, используя закон полного отражения, закон Ламберта, закон обратных квадратов для распространения энергии в пространстве, позволяют определить координаты положения двух точечных источников излучения и координаты точек линии зеркально отражающей поверхности рефлектора [7]. Условием равномерного распределения потока излучения по поверхности сушки является равенство косинусов углов падения лучей прямого излучения от источника и отраженного излучения

от зеркальной поверхности отражателя на каждый участок поверхности:

$$\cos(\gamma_i) + \cos(\alpha_i) - k_i = \cos(\alpha_0) = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол прямого излучения источника на облучаемую поверхность;  $\gamma$  – угол отраженного излучения;  $k$  – коэффициент учета закона обратных квадратов; индексы: 0 – ближайшая к источнику излучения точка поверхности облучения;  $i$  – номер участка поверхности облучения.

Для анализа распределения теплового потока излучения по облучаемой поверхности нами разработаны тепловые модели переноса энергии излучением в устройствах инфракрасной сушки, реализованные как численное решение уравнений переноса излучения и кондуктивно-конвективного теплообмена газа со свойствами воздуха методом конечных элементов [8].

В основе модели анализа лежат уравнения энергии и переноса излучения в оптически прозрачной среде.

Дифференциальное уравнение энергии, используемое в тепловой модели, имеет вид [9], где объемным источником тепла  $Sh$  выступает энергия излучения:

$$\nabla \cdot (\vec{v} \cdot (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + Sh \quad (2)$$

Здесь:  $E$  – энергия элементарного объема;  $h$  – энтальпия газовой смеси;  $J$  – диффузия компонента смеси газов;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $p$  – давление газа;  $T$  – температура;  $v$  – скорость газа;  $\rho$  – плотность газа;  $\tau$  – коэффициент трения в газе,  $eff$  – эффективный.

Уравнение переноса излучения через элементарный объем серого газа температурой  $T$  из положения  $\vec{r}$  в направлении  $\vec{s}$  имеет вид [10]:

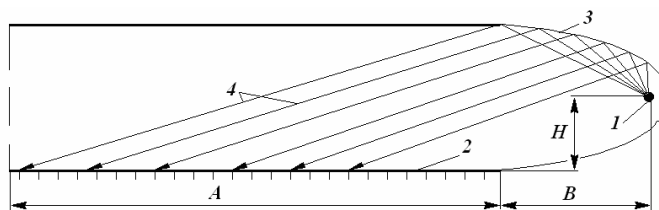
$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3)$$

где:  $a$  – коэффициент поглощения;  $I$  – интенсивность излучения;  $n$  – коэффициент преломления;  $T$  – температура;  $\sigma$  – коэффициент рассеивания;  $\Phi$  – индикатриса рассеяния;  $\Omega$  – телесный угол.

Для решения уравнения переноса излучения используется метод дискретных ординат. Решением задачи анализа являются поля температур и тепловых потоков на поверхности сушки без учета и с учетом испарения влаги. Граничным условием для источника излучения задается тепловая мощность на его поверхности, на остальных границах рабочего объема – оптические свойства поверхностей и условия сложного теплообмена 3-го рода на внешней стенке границ для естественно-конвективного теплообмена.

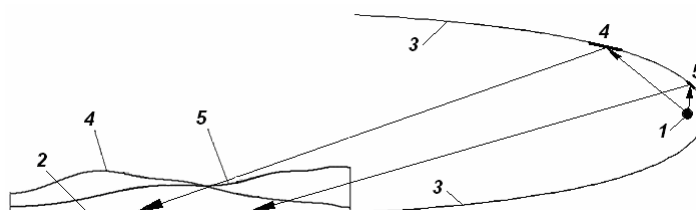
### Основные результаты

Для установления корреляционной связи построим отражающую поверхность, участки которой последовательно направляют поток излучения на участки поверхности облучения, как показано на рис.2. Корреляционную связь установим как статистическую зависимость места положения центра тяжести распределения теплового потока на облучаемой поверхности от номера участка поверхности отражателя, излучающего этот тепловой поток на поверхность, или номера участка облучаемой поверхности (см. рис.3).



**Рис. 2. Схема направлений лучей отраженного излучения от поверхности отражателя на поверхность облучения**

**1 – источник излучения; 2 – поверхность облучения; 3 – зеркально отражающая поверхность; 4 – лучи отраженного излучения**



**Рис. 3. Распределение потока излучения, отраженного от участка зеркала, по поверхности облучения**

**1, 2, 3 – обозначения см. на рис.2; 4, 5 – участки зеркала и соответствующие им распределения потока излучения по поверхности облучения**

Получить такую зависимость можно двумя способами: построить распределение теплового потока на облучаемой поверхности только для излучения от заданного участка поверхности зеркала отражателя, либо построить распределение теплового потока на облучаемой поверхности, исключив из линии зеркала заданный участок поверхности. Выполним построение обоими способами.

Для определения зависимости первым способом сначала построим распределение для прямого потока излучения от источника. Это распределение будем вычитать из распределений для источника и заданного участка линии зеркала.

С помощью оптико-геометрической модели для условия (1) построим профиль отражающей поверхности. Распределение потока излучения вычислим с помощью тепловой конечно-элементной модели, в которой поверхность зеркального отражателя зададим как абсолютно черную с бесконечным стоком тепла (коэффициент теплоотдачи на внешней стороне поверхности  $\alpha_{\text{внеш}} \rightarrow \infty$ ). Свойства среды в расчетной области определим как свойства воздуха. Расчет выполним для исходных данных: диаметр источника излучения  $r_0 = 2,5$  мм; тепловая мощность источника излучения  $q_0 = 20000$  Вт/м<sup>2</sup>; полуширина поверхности облучения  $A = 0,5$  м; высота положения источника над поверхностью облучения  $H = 0,05$  м; удаление источника излучения от границы облучаемой поверхности  $B = 0,172$  м; число участков разбивки линии зеркала отражателя для оптико-геометрической модели  $n = 100$ . Шаг сетки для конечно-элементной модели – 1 мм (72000 конечных элементов). В результате теплового расчета получим мощность источника излучения  $Q = 314,2$  Вт; суммарный тепловой поток на поверхность шириной  $A$  составляет 10,1 Вт.

Распределение потока излучения можно вычислить в соответствии с законами Ламберта и обратных квадратов по формуле:

$$q(i) = q_0 \frac{r_0}{r(i)} \cdot \cos(\alpha(i)), \quad (4)$$

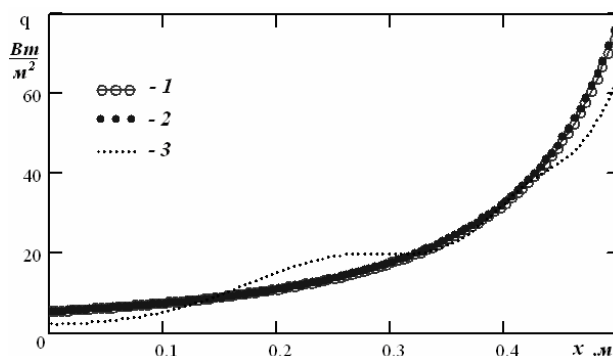
где:  $q(i)$  – поток излучения, падающий на  $i$ -й участок поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_0$  – поток излучения источника, Вт/м<sup>2</sup>;  $r_0$  – радиус поверхности источника излучения, м;  $r(i)$  – длина луча от центра источника излучения до  $i$ -го участка поверхности облучения, м;  $\alpha(i)$  – угол между направлением луча от источника к участку поверхности и перпендикуляром к участку поверхности.

Распределение потока излучения можно вычислить также с помощью формулы:

$$q(i) = Q \frac{\arccos(\cos(\alpha(i)))}{2\pi} \cdot \frac{1}{dA}, \quad (5)$$

где:  $Q = q_0 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_0)$  – мощность излучения источника, Вт;  $\cos \alpha(i)$  – косинус угла, образуемого лучами, падающими на границы  $i$ -го участка поверхности;  $dA$  – длина участка поверхности облучения, м.

Распределение потока излучения по участкам поверхности облучения приведено на рис.4. С.к.о. отличия распределения по тепловой конечно-элементной модели от распределений, вычисленных по формулам (1) и (2), не превышает 3,94 Вт/м<sup>2</sup>. Суммарный тепловой поток, вычисленный по формулам (1) и (2), составил 10,25 Вт и 10,43 Вт соответственно.

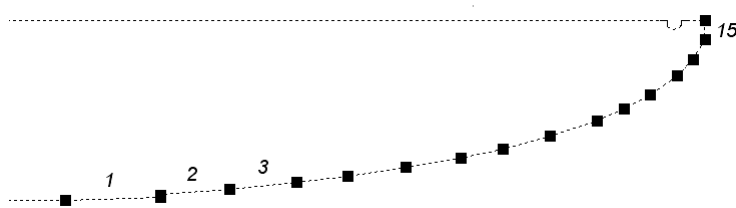


**Рис. 4. Распределение потока прямого излучения от источника по поверхности облучения**

**1- расчет по формуле (1); 2 – расчет по формуле (2); 3 – расчет по тепловой модели**

Тепловой поток прямого излучения источника на поверхность облучения составляет 7-8% от мощности источника, что говорит о том, что распределение потока излучения по поверхности определяется, в основном, профилем отражающего излучение зеркала.

Профиль отражателя разобьем на 15 участков. Для приведенных выше исходных данных выполним расчеты тепловой модели, в которых для каждого участка линии зеркала последовательно будем устанавливать свойства зеркально отражающей поверхности с нулевой степенью черноты, а для остальных участков задавать свойства абсолютно черного тела с бесконечным стоком тепла. На рис.5 приведена схема разбивки линии зеркала на участки с указанием их нумерации. Контурная картина интенсивности излучения в расчетной области рассматриваемого примера для случая, когда зеркало отражателя представлено только 9-м участком линии зеркала, приведена на рис.6, на котором отчетливо виден отраженный поток излучения от 9-го участка линии зеркала.



*Рис. 5. Схема разбивки линии зеркала на участки*



*Рис. 6. Контурная картина потока излучения, отраженного от участка зеркального отражателя*

*1 – источник излучения; 2 – поверхность облучения; 3 – участок 9 зеркала отражателя*

Полученные распределения потока излучения - результат совместного облучения поверхности источником и рассматриваемым участком линии зеркала. По результатам расчетов построим распределение  $q(x)$  разности полученных в расчетах распределений тепловых потоков совместного облучения и потоков для случая, когда отражателя нет. На рис.7 приведены кривые распределения  $q(x)$  для всех 15-ти участков линии зеркала. Кривые отражают как характер рассеяния излучения от участка линии зеркала, так и степень влияния на результирующее распределение потока излучения. Как следует из графика, участки линии зеркала, расположенные ближе к источнику (11 - 15) вносят существенно больший вклад в результирующий поток излучения на поверхность облучения по сравнению с периферийными участками (1 - 4).

По данным распределений, представленным на рис.7, построим зависимость центра тяжести распределения теплового потока на облучаемой поверхности от номера участка поверхности отражателя (см. рис.8).

Центр тяжести распределения, или взвешенное среднее определим по формуле

$$E(i) = \frac{\sum_{j=1}^n q(i, j) \cdot j}{\sum_{j=1}^n q(i, j)}, \quad i = 1 \dots n; \quad (6)$$

где  $n$  – количество участков линии зеркала.

Коэффициент корреляции зависимости  $E(i)$  составляет 0,882, что свидетельствует о тесной связи между оптико-геометрической моделью и тепловой моделью рабочего объема устройства инфракрасной сушки.

Определим корреляционную связь вторым способом, для чего сначала построим распределение потока излучения на облучаемой поверхности для линии зеркала, все участки которой являются зеркально отражающими с нулевым значением степени черноты. Из этого распределения будем вычитать распределения, полученные для случаев, когда заданный участок линии зеркала будет «выключен», то есть получит свойства абсолютно черного тела с бесконечным стоком тепла. Для решения задачи теплопереноса с помощью оптико-

геометрической модели построим профили отражателей для случаев расстояния между поверхностями  $2 \cdot H = 100$  мм, 125 мм и 150 мм. Для этих профилей решим задачу лучистого теплообмена с использованием тепловой модели. Результаты расчетов зависимостей  $q(x)$  и  $E(i)$  приведены на рис.9.

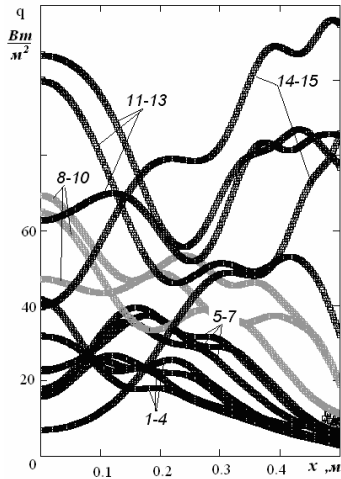


Рис. 7. Распределения лучистого теплового потока для участков отражающей поверхности

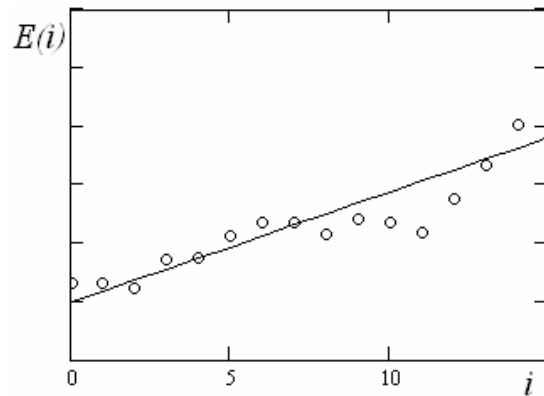


Рис. 8. Зависимость положения центра тяжести распределения лучистого теплового потока от номера участка отражающей поверхности

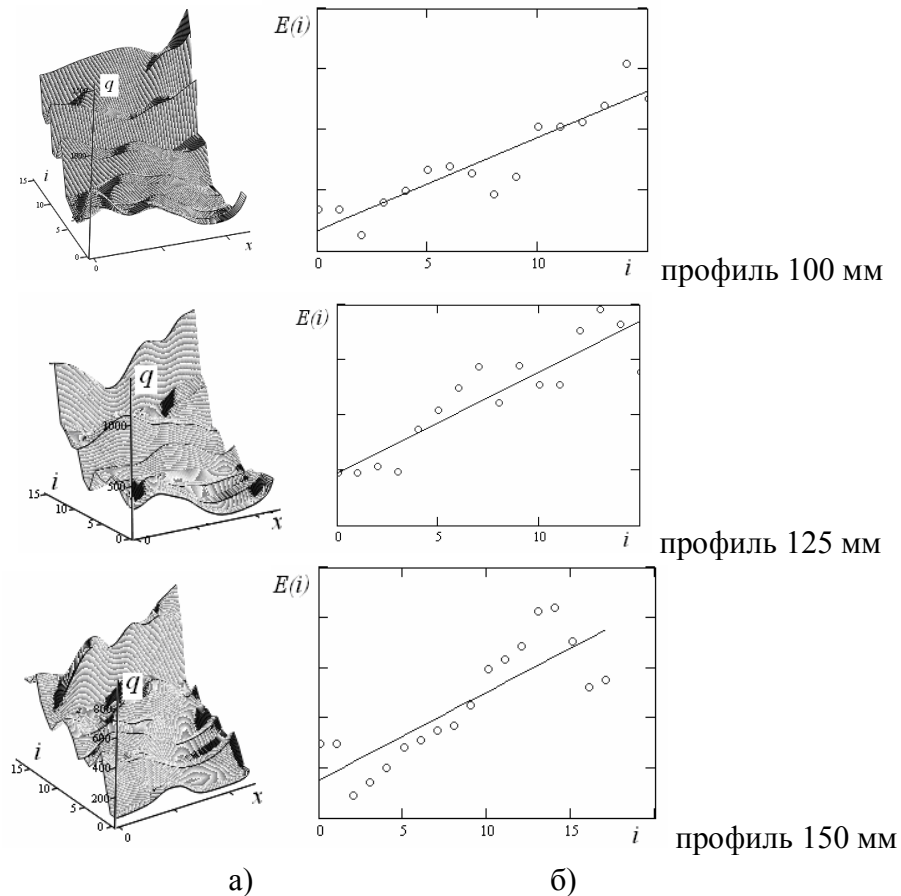


Рис. 9. Распределения лучистого теплового потока по облучаемой поверхности (а) и зависимости положения центра тяжести распределения лучистого теплового потока от номера участка отражающей поверхности



Отсутствие отражения заданного участка линии зеркала приводит к снижению интенсивности облучения соответствующего участка поверхности сушки. На рис.9а приведены изменения распределения отклонения  $q(x)$  при последовательном «выключении» участков зеркала отражателя, а на рис.9б - линия регрессии номера «выключенного» участка и номера участка поверхности сушки, соответствующего центру распределения  $E(i)$ . Значения коэффициентов корреляции  $\rho$  для рассматриваемых профилей составили: профиль 100мм –  $\rho = 0,919$ ; профиль 125мм –  $\rho = 0,891$ ; профиль 150мм –  $\rho = 0,829$ , что позволяет считать корреляционную связь тесной.

Для сравнения аналогичное исследование корреляционной связи выполнено для эллиптического профиля зеркала, для которого коэффициент корреляции составил 0,291. Малая величина коэффициента указывает на отсутствие однозначной связи между тепловым потоком излучения участка профиля отражателя и потоком излучения, падающим на соответствующий участок поверхности сушки. То есть на один участок поверхности могут отражать излучение несколько участков профиля отражателя.

### Выводы

Установленная тесная корреляционная связь оптико-геометрических моделей и тепловой конечно-элементной модели рабочего объема устройства инфракрасной сушки позволяет использовать тепловую модель для коррекции геометрии линии зеркала как результата построений оптико-геометрической модели. Данные о распределениях  $q(x)$ , представленные на рис.7, являются основой как для анализа чувствительности проектируемых профилей к погрешностям изготовления, так и основой для корректирующих изменений профиля отражающей поверхности с целью получения профиля с заданными показателями равномерности распределения лучистого теплового потока по поверхности облучения.

Таким образом, совместное использование оптико-геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена позволяет разрабатывать рабочие объемы устройств инфракрасной сушки с заданной степенью равномерности распределения потока излучения по поверхности продукта сушки в устройствах камерного и конвейерного типов.

### Список литературы

1. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 407 с.
2. Блох А.Г. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г.Блох, Ю.А.Журавлев, Л.Н.Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432с.
3. Завалий А. А. Инфракрасная сушка плодов и овощей / А. А. Завалий, И. В. Янович // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет». – Серія «Сільськогосподарські науки». Випуск 137. – Сімферополь, 2011. – С.189-195.
4. Пат. 39987, МПК F 26 В 9/06. Сушильний пристрій / Завалий А.А., Янович И.В., Попков В.О., Воложанинов С.С.; заявитель и патентообладатель Завалий А.А., Янович И.В., Попков В.О., Воложанинов С.С. – № и200810790; заявл. 01.09.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. №6.
5. Трёмбач В.В. Световые приборы: Учеб. для вузов по спец. «Светотехника и источники света»/ В.В.Трёмбач. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1990. – 463 с.
6. Суржиков С.Т. Вычислительный эксперимент в построении радиационных моделей излучающего газа/ С.Т.Суржиков. – М.: Наука, 1992. – 157с.

7. Завалий А.А. Оптико-геометрические модели проектирования отражающих поверхностей устройств инфракрасной сушки/ А.А.Завалий // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – Volume 13C. – Lublin 2011. С.150-158.
8. Завалий А.А. Компьютерное тепловое моделирование и анализ инфракрасных систем равномерного облучения плоских поверхностей/ А.А.Завалий. – Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. - №1(88). – С.5-11.
9. Chui E. H. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite/ Chui E. H. and Raithby G. D.-Volume Method. Numerical Heat Transfer, Part B,23:269-288, 1993.
10. The Discrete Ordinates (DO) Radiation Model. Radiative Heat Transfer. Modeling Heat Transfer. Fluent 6.0 manual // Help for Fluent 6.1 package. Fluent Inc.,2001.-V.11.-P.14-15.

### Spisok literatury

1. Ginzburg, A.S. (1966), *Infrakrasnaia tekhnika v pishchevoi promyshlennosti [Infrared technology in the food industry]*, Pishchevaia promyshlennost, Moscow, Russia.
2. Blokh, A.G. (1991), *Teploobmen izlucheniem: Spravochnik [Radiation heat transfer: Handbook]*, Energoatomizdat, Moscow, Russia.
3. Zavalii, A.A., Janovich I.V., (2011), “Infrared drying of fruits and vegetables”, *Naukovi pratsi Pivdenного filialu Natsionalного universitetu bioresursiv i prirodokorystuvannia Ukrainy "Krimskiy agrotehnologichniy universitet", "Silskogospodarski nauki", Vol. 137, Simferopol, 2011, pp.189-195.*
4. Zavalii, A.A., Janovich, I.V., Popkov, V.O., Volozhaninov, S.S., (2009), “Dryer”, *Pat.39987, MPK F 26 B 9/06, Bull. no.6.*
5. Trembach, V.V. (1990), *Svetovie pribory [Light devices]*, Vysshiaia shkola, Moscow, Russia.
6. Surzhikov, S.T. (1992), *Vychislitelnyi eksperiment v postroenii radiacionnykh modelei izluchaiushcheho gaza [Computer experiment in constructing models of radiation emitting gas]*, Nauka, Moscow, Russia.
7. Zavalii, A.A., (2011) “Optical-geometric models for designing reflecting surfaces of the infrared drying device”, *Motrol. Motorization and power industry in agriculture, Vol. 13C. – Lublin 2011. pp.150-158.*
8. Zavalii, A.A., (2012) “Computer modeling and analysis of thermal infrared systems with uniform irradiation of flat surfaces”, *Aviatsionno-kosmicheskaia tekhnika i tekhnologia, 2012. - №1(88). – pp.5-11.*
9. Chui E. H. (1993), “Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite”, *Volume Method. Numerical Heat Transfer, Part B,23:269-288, 1993.*
10. “The Discrete Ordinates (DO) Radiation Model. Radiative Heat Transfer. Modeling Heat Transfer. Fluent 6.0 manual”, *Help for Fluent 6.1 package. Fluent Inc.,2001.-V.11.-P.14-15.*

## СПІЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧНОЇ І ТЕПЛОВОЇ МОДЕЛЕЙ ПРОМЕНИСТОГО ТЕПЛООБМІНУ ПРИ РОЗРОБЦІ РОБОЧОГО ОБ'ЄМУ ПРИСТРІЮ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СУШКИ

**Анотація:** розглядаються схеми пристроїв інфрачервоного сушіння продукції сільськогосподарського виробництва, в яких з метою підвищення об'ємної продуктивності, зниження теплових втрат і підвищення ступеня рівномірності сушки використовується цілеспрямований розподіл відбитого теплового випромінювання високотемпературних джерел.

Розроблено метод створення робочого об'єму пристроїв інфрачервоного сушіння, що використовують переважно дзеркально відбите теплове випромінювання. Метод заснований на спільному використанні оптико-геометричної та теплової моделей променистого теплообміну в оптично прозорих середовищах. Розроблено оптико-геометричні моделі для визначення геометрії відбиваючих поверхонь і теплові моделі променистого теплообміну в пристроях інфрачервоної сушки для аналізу розподілу потоку теплового випромінювання на поверхні продукту сушіння. Встановлено кореляційний зв'язок між результатами моделювання променистого теплообміну в пристроях інфрачервоного сушіння із застосуванням оптико-геометричних і теплових моделей переносу променистої енергії. Наявність тісного кореляційного зв'язку дозволяє виконувати корекцію профілів відбиваючих поверхонь, отриманих з використанням оптико-геометричної моделі, за результатами аналізу, виконаного з використанням теплової моделі променистого теплопереносу. Спільне використання оптико-геометричної та теплової моделей променистого теплообміну дозволяє розробляти робочі об'єми пристроїв інфрачервоного сушіння із заданим ступенем рівномірності

розподілу потоку випромінювання по поверхні продукту сушіння в пристроях камерного та конвеєрного типів.

**Ключові слова:** інфрачервоний, сушка, оптико-геометрична модель, теплова модель, кореляція.

## COMBINED USE OF OPTICAL-GEOMETRICAL AND THERMAL MODELS OF RADIANT HEAT EXCHANGE WHEN DESIGNING THE EFFECTIVE VOLUME OF INFRARED DRYING DEVICE

*Summari:* the schemes of infrared drying devices for agricultural products, where a targeted distribution of reflected radiation from high-temperature sources is used in order to improve the volumetric capacity, to reduce the heat loss and to improve the uniformity of drying, are reviewed.

The method of creating an effective volume of infrared drying devices, using predominantly specularly reflected thermal radiation, has been developed. The method is based on combined use of optical-geometrical and thermal models of radiant heat exchange in optically transparent environments. Optical-geometrical models to determine the geometry of reflecting surfaces and thermal models of radiant heat exchange in the infrared drying devices have been developed to analyze the distribution of the heat radiation flux along the surface of the drying product. Correlation between the results of radiant heat exchange simulation in the infrared drying devices using optical-geometrical and thermal models of radiant energy transfer has been established. The presence of close correlation makes it possible to correct profiles of reflecting surfaces obtained using optical-geometric model according to the results of analysis carried out using the thermal model of radiant heat transfer.

Combined use of optical-geometrical and thermal models of radiant heat transfer allows us to design effective volumes of infrared drying devices with an indicated degree of radiation flux uniform distribution along the surface of the drying product in the chamber and conveyor devices.

**Key words:** infrared, dryer, optical-geometrical model, thermal model, correlation.