

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА ИНФРАКРАСНОЙ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Завалий А.А., к.т.н, доцент ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет»

Разработаны методы последовательной оптимизации профиля отражающей поверхности рабочего объема устройств инфракрасной сушки, основанные на сопоставлении геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена и использовании функций чувствительности распределения лучистого теплового потока по поверхности облучения к углу положения участков линии отражающей поверхности.

Выполнена оптимизация профилей отражающих поверхностей для линейного источника излучения, целью которой является обеспечение равномерного распределения потока излучения по облучаемой плоской поверхности.

Ключевые слова: инфракрасный излучатель, отражающая поверхность, облучаемая поверхность, оптимизация

Постановка задачи. Задачей построения профиля отражающей поверхности в устройстве инфракрасной (ИК) сушки является обеспечение равномерности распределения потока излучения по поверхности продукта сушки.

Для проектирования рабочих объемов устройств ИК сушки, то есть вычисления координат взаимоположения источников излучения, поверхности сушки и формы отражающих поверхностей мы используем оптико-геометрические модели, связывающие правило распределения потока излучения по поверхности и угол положения участка зеркально отражающей поверхности [1]. Результат расчета анализируем тепловыми конечно-элементными моделями, позволяющими определить поля температуры и тепловых потоков излучения в расчетной области, ограниченной поверхностями источников излучения, отражателей и поверхности сушки [2]. Анализ тепловых моделей рабочих объемов показывает, что поверхности отражателей, полученные с помощью оптико-геометрических моделей, не обеспечивают искомое равномерное распределение потоков излучения по поверхности облучения. Причинами наблюдаемой неравномерности являются отличия оптико-геометрических и тепловых моделей:

- в оптической модели источник излучения точечный, а в тепловой модели является многогранником конечных размеров, определяемых размерами границ конечных элементов;

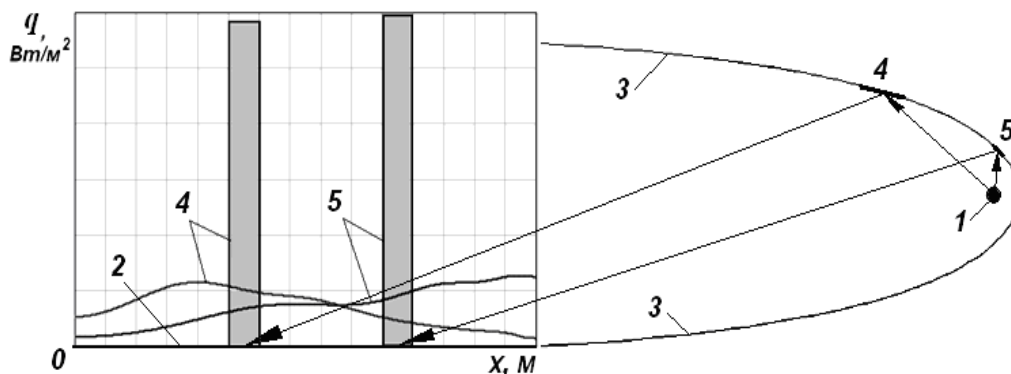
- в оптической модели поток излучения на участок облучаемой поверхности определяется как сумма прямого излучения от источника и

отраженного излучения от соответствующего участка линии зеркала, в тепловой модели поток излучения определяется суммой потоков от всех излучающих поверхностей рабочего объема, включая потоки излучения многократного отражения;

- линия зеркала в оптической модели получена как точечная функция для конечного количества точек разбивки поверхности облучения, в тепловой модели линия зеркала – интерполяционная ломаная для линейной интерполяции, состоящей из конечного числа границ конечных элементов треугольной формы.

Указанные отличия обуславливают различное описание потока излучения, падающего на поверхность облучения, оптическими и тепловыми моделями. Оптические модели представляют распределение потока отраженного от i -го участка линии зеркала излучения по облучаемой поверхности ступенчатой зависимостью $q_i(x)$, в которой величина ступеньки определяется углом α_i падения отраженного излучения источника от участка зеркала и длиной l_i оптического луча, представленной суммой расстояний от источника до участка зеркала и от участка зеркала до участка поверхности отражения («ступеньки» 4 и 5 на рис.1):

$$q_i(x) = \begin{cases} q(\alpha_i, l_i) = \text{const} & \text{если } x_i \leq x \leq x_{i+1}, \\ 0 & \text{если } x < x_i \vee x > x_{i+1}. \end{cases} \quad (1)$$



1 – источник излучения; 2 – облучаемая поверхность; 3 – зеркало отражателя; 4, 5 – участки зеркала и соответствующие им распределения потока излучения по поверхности облучения

Рис. 1. Распределение потока излучения, отраженного от участка зеркала, по поверхности облучения

В тепловой модели излучение, отраженное от i -го участка линии зеркала распределяется по всей длине поверхности облучения в виде нелинейной зависимости, центр масс которой располагается вблизи места положения i -го участка поверхности облучения (кривые 4 и 5 на рис.1):

$$q'_i(x) = q'(\alpha_i, l_i) = \text{var} . \quad (2)$$

Величина α_i зависит от количества участков линии зеркала N , угла положения участка зеркала β_i и радиус-вектора его положения относительно

источника излучения r_i (рис.2). Вид зависимости $q'_i(x)$ существенно различен для различных участков зеркала и может изменяться для одного и того же участка как при изменении его угла положения β_i (рис.3), так и при изменении радиус-вектора положения r_i .

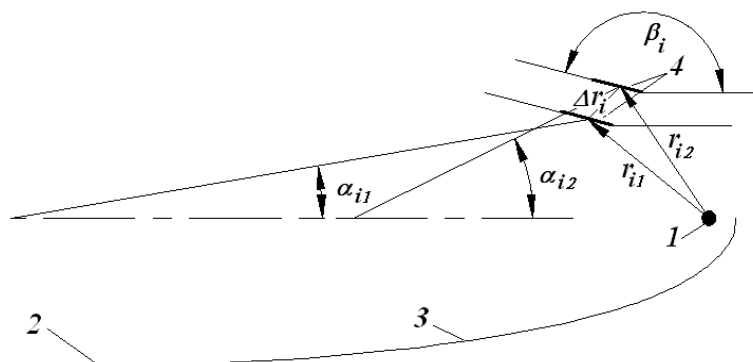
Распределение потока излучения по облучаемой поверхности представляет собой сумму распределений источника излучения $q_0(x)$ и участков зеркала:

- для оптико-геометрической модели

$$q(x) = q_0(x) + \sum_{i=1}^n q_i(x), \quad (3)$$

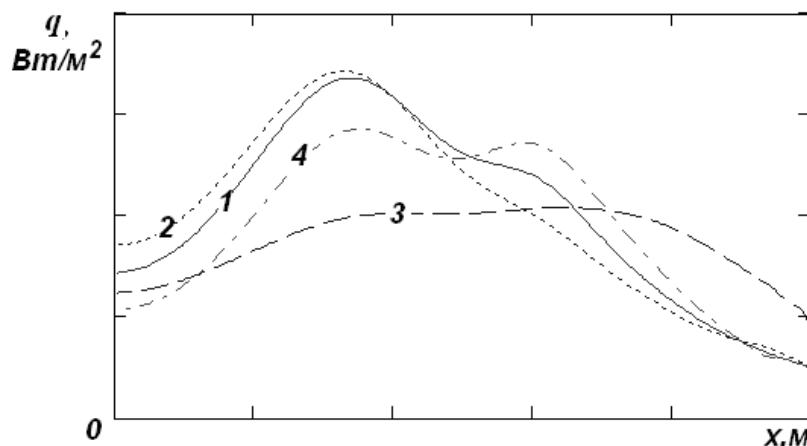
- для тепловой модели

$$q'(x) = q_0'(x) + \sum_{i=1}^n q_i'(x). \quad (4)$$



1 – источник излучения; 2 – поверхность облучения; 3 – зеркало отражающей поверхности; 4 – участок линии зеркала в исходном положении (радиус-вектор r_{i1} , угол падения α_{i1}) и в смещенном положении (радиус-вектор r_{i2} , угол падения α_{i2})

Рис. 2. Изменение положения лучей отраженного излучения при смещении участка профиля зеркала



1 – расчетное значение β_i ; 2, 3 – поворот участка вокруг правой конечной точки участка на 1° и 5° по часовой стрелке; 4 - поворот участка вокруг правой конечной точки участка на 1° против часовой стрелки

Рис. 3. Распределение $q'_i(x)$ для участка 4 на рис.1

Таким образом, $q'(x)$ представляет собой сумму функций $q'_i(x)$, вид каждой из которых определяется геометрией рабочего объема и количеством участков линии зеркала. Количественной мерой степени неравномерности распределения $q'(x)$ являются дисперсия потока излучения $\sigma^2(q'(x))$ и максимальная нормированная разность потока излучения $\Delta \max(q'(x))$:

$$\Delta \max(q'(x)) = \frac{q'(x)_{\max} - q'(x)_{\min}}{\bar{q}'(x)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $q'(x)_{\max}$ – наибольшее значение, $q'(x)_{\min}$ – наименьшее значение, $\bar{q}'(x)$ – среднее значение потока в распределении.

Задача обеспечения равномерности распределения потока излучения по поверхности облучения может быть сформулирована как задача безусловной оптимизации:

$$\Delta \max(q'(x)) \rightarrow \min \text{ или } \sigma^2(q'(x)) \rightarrow \min \quad (6)$$

для векторов независимых параметров $\beta = \{\beta_i\}_1^N$ и $r = \{r_i\}_1^N$.

Из-за неопределенности вида функций $q'_i(x)$ задачу (6) невозможно решить регулярными методами оптимизации, позволяющими получить оптимальное решение, обладающее свойствами эффективности и несмещенности [3]. Применение регулярных методов возможно, если задаться видом функций $q'_i(x)$, например полиномиальным. При этом задача (6) замещается задачей минимизации для функций $q'_i(x)$ заданного вида, решение которой очевидно также не позволит получить оптимальное решение задачи (6). Другим путем решения задачи оптимизации является разработка вычислительных алгоритмов, позволяющих получить приближенное решение, которое следует называть не оптимальным, а эффективным, то есть полученным за конечное число шагов решения задачи и удовлетворяющее неравенству

$$\Delta \max(q'(x)) < \varepsilon \text{ или } \sigma^2(q'(x)) < \varepsilon', \quad (7)$$

где ε и ε' – положительно определенные величины предельно допустимого отклонения значений функции $q'(x)$ от ее среднего значения и дисперсии, соответственно.

Таковыми алгоритмами являются алгоритмы последовательной оптимизации, заключающиеся в последовательных приближениях к оптимальному решению путем «малых» вариаций управляющих функций, таких как $q'_i(x)$, и многократном решении «прямых» задач отыскания параметров β_i и r_i . Для выполнения вариаций используют градиентные методы с переменным шагом приращения независимой переменной и методы случайного поиска [8].

2. Алгоритмы последовательной оптимизации

Для поиска эффективного решения, удовлетворяющего условию (7), нами предложены два алгоритма, обеспечивающие последовательное увеличение равномерности распределения потока излучения по поверхности

облучения. Первый алгоритм основан на сопоставлении геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена в рабочем объеме устройства ИК сушки. Второй алгоритм основан на использовании функций чувствительности искомого распределения лучистого теплового потока по поверхности облучения к углу положения участков линии отражающей поверхности.

Алгоритм сопоставления геометрической и тепловой моделей :

1. Для заданных размеров поверхностей облучения и расстояния между ними решением оптико-геометрической модели получают координаты положения источника излучения и исходный точечный профиль отражающей поверхности - зеркала. Для точечного профиля строят интерполяционную кривую кубическими сплайнами. Решают прямую задачу лучистого теплообмена в рабочем объеме, получают исходное распределение $q'(x)$.

2. Для расчетных точек профиля строят интерполяционную ломаную отрезками прямых, для каждого отрезка выполняют построение зеркально отраженного луча от источника излучения, считая источник точечным.

3. Перемещают место падения отраженного луча из участка с избытком значения лучистого потока в участок с его дефицитом. В соответствии с выполненным перемещением изменяют угол положения участка линии зеркала, отражающего данный луч. Центром вращения участка является его середина.

4. Для измененного профиля решают тепловую задачу, получают новое распределение $q'(x)$. Для полученного распределения проверяют условие (5.7). При невыполнении условия повторяют шаги 2, 3 алгоритма.

Алгоритм функций чувствительности искомого распределения лучистого теплового потока по поверхности облучения к углу положения участков линии отражающей поверхности:

1. Получают исходное распределение $q'(x)$. Выполняют построение зависимости $\Delta q'(x)$ отклонений $q'(x)$ от среднего значения $q'_{cp}(x)$, определяют участки поверхности облучения с дефицитом и избытком потока излучения.

2. Кривую зеркала разбивают на участки, обеспечивающие одинаковые интегральные потоки излучения на облучаемую поверхность. Для этого профиль зеркала разбивают на участки в соответствии с законом обратных квадратов, затем полученные участки линеаризуют границами конечных элементов. Решают прямую задачу лучистого теплообмена в рабочем объеме для излучения каждого участка. Полученное решение используют для коррекции размеров участков линии профиля, позволяющей учесть конечные размеры источника излучения и частичное затенение поверхности облучения источником излучения участков линии зеркала.

3. Независимыми переменными задачи оптимизации выбирают углы поворота участков линии зеркала β_i . Решением прямой задачи теплообмена для участков линии зеркала, повернутых на угол $\delta\beta_i = \pm 1^\circ$, определяют

распределения коэффициентов чувствительности $\delta q'_i(x)$ зависимостей $q'_i(x)$ к изменению β_i . Кривые распределения коэффициентов чувствительности $\delta q'_i(x)$ сопоставляют с распределением $\Delta q'(x)$ дефицита и избытка потока излучения и ранжируют участки линии зеркала по степени влияния на $q'_i(x)$.

4. Варьируя $|\delta\beta_i| \leq 1^\circ$ методами перебора и случайного поиска, минимизируют функцию

$$\Delta \max \left[\Delta q'(x) + \sum_{i=1}^N \delta\beta_i \cdot \delta q'_i(x) \right] \rightarrow \min \text{ или } \sigma^2 \left[\Delta q'(x) + \sum_{i=1}^N \delta\beta_i \cdot \delta q'_i(x) \right] \rightarrow \min. \quad (8)$$

Используя значения $\delta\beta_i$, строят новый профиль и для него решают задачу лучистого теплообмена. При выполнении условия (7) решение прекращают.

5. При невыполнении условия (7) последовательно в порядке убывания влияния на $q'_i(x)$ для каждого из участков изменяют угол его положения и решением задачи теплообмена определяют новое распределение $q'_i(x)$. Изменение угла выполняют переменным шагом до достижения лучшего результата в соответствии с целевой функцией (6). При выполнении условия (7) решение прекращают.

6. Если условие (7) выполнить не удастся, для участков ранжированного ряда независимыми переменными задачи оптимизации выбирают смещение радиус-векторов положения Δr_i (рис.2) и повторяют п.п.3, 4, 5 алгоритма. Следующим этапом улучшения решения задачи (6) является уменьшение размера участка линии зеркала. Последовательно в порядке убывания влияния на $q'_i(x)$ участки ранжированного ряда разделяют на 2 равные части. Для полученных частей выполняют п.п.3, 4, 5, 6 алгоритма.

Приведенные алгоритмы применены нами для оптимизации профиля зеркала для рабочего объема ИК камеры, содержащий две параллельные поверхности облучения длиной $L = 1000$ мм и расстоянием между поверхностями (высотой профиля) $h = 100$ мм.

3. Оптимизация профиля высотой 100 мм

Полученные решением оптико-геометрической модели исходный точечный профиль линии зеркала и координаты X_c и Y_c места положения точечного источника излучения приведены на рис.4. Отраженные лучи (поз.4 на рис.4) профиля отражающей поверхности последовательно распределяются по поверхности облучения.

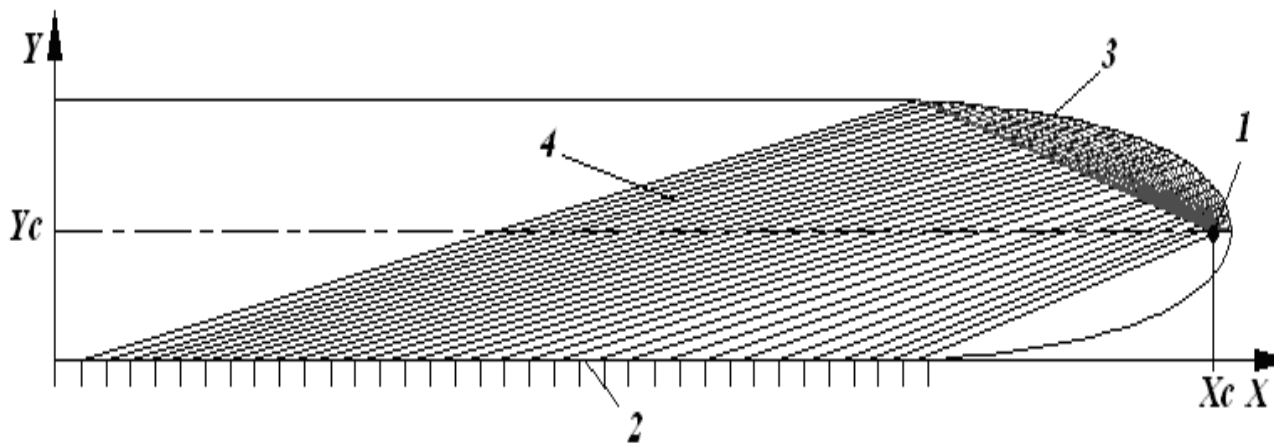
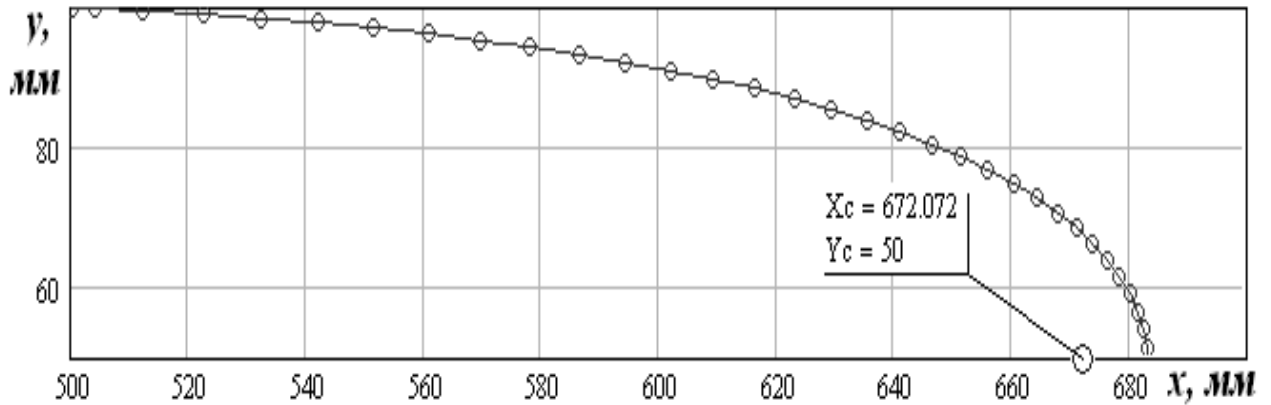


Рис. 4. Исходный профиль линии зеркала отражающей поверхности

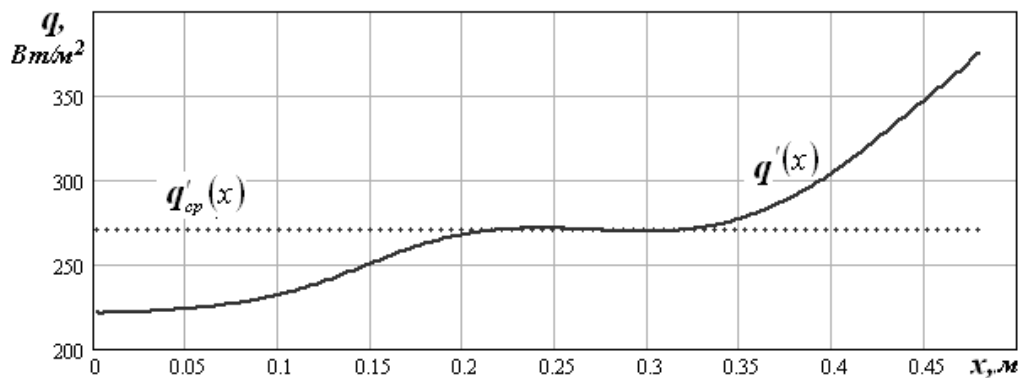


Рис. 5. Распределение $q'(x)$ для исходного профиля

Распределение потока излучения определим решением задачи теплообмена излучением в рабочем объеме. Исходными данными для решения задачи лучистого теплообмена примем для источника излучения: диаметр – 5 мм; степень черноты поверхности – 1; тепловая мощность – 20000 Вт/м². Для стенок: степень черноты поверхности облучения – 1; степень черноты зеркала – 0, коэффициент диффузности отражения зеркала – 0. Условия теплообмена на внешних границах стенок – условия 3-го рода (коэффициент конвективной теплоотдачи - 10 Вт/м²К, температура окружающей среды – 300 К, степень черноты – 1). Распределение $q'(x)$ для исходного профиля приведено на рис.5. Характеристиками неравномерности

распределения являются: среднее значение $q'_{cp}(x) = 270,2 \text{ Вт/м}^2$; $\Delta \max(q'(x)) = 57,6\%$; $\sigma(q'(x)) = 38,13 \text{ Вт/м}^2$. Для повышения степени равномерности следует увеличить значения $q'(x)$ на участке $x \in [0; 0,15]$ и уменьшить на участке $x \in [0,35; 0,5]$.

Оптимизация алгоритмом функций чувствительности. Линию зеркала разбиваем на 15 участков лучами, исходящими из центра источника излучения. Углы между соседними лучами устанавливаем так, что потоки излучения от каждого участка примерно одинаковы (рис.6а).

Решением задачи лучистого теплообмена для каждого участка линии зеркала определяем интегральные потоки отраженного излучения $q'_i(x)$ (рис.6б). На рис.6в представлены суммарные значения потока излучения $S_i = \sum_{j=1..15} q'_i(x_j)$ i -го участка зеркала на j -е участки поверхности облучения.

Среднее значение потока излучения $q'_i(x)$ составило $12,4 \text{ Вт/м}^2$ при минимальном значении $10,8 \text{ Вт/м}^2$ (участок 8) и максимальном $17,2 \text{ Вт/м}^2$ (участок 14). Отличие S_i для этой разбивки не превышают 60%, что обеспечивает практически равное влияние каждого участка линии зеркала на суммарный поток излучения и распределение $q'(x)$.

Распределения коэффициентов чувствительности интенсивности излучения $\delta q'_i(x)$ к углу положения участка β_i получаем для поворота участков относительно своей крайней точки с большей продольной координатой (по оси OX). На рис.7 приведены распределения $\delta q'_i(x)$ для «положительных» поворотов 15-го участка зеркала, увеличивающих рабочий объем, и «отрицательных» поворотов, уменьшающих рабочий объем. Наилучшая комбинация распределений для фиксированных значений $\delta \beta_i = \pm 1^\circ$ может быть определена простым перебором. Если принять допущение о линейной зависимости $q'_i(x)$ от β_i в диапазоне изменения $|\delta \beta_i| \leq 2^\circ$, то количество комбинаций распределений $\delta q'_i(x)$ может быть увеличено дробными значениями $\delta \beta_i$. В этом случае для поиска наилучшей комбинации распределений $\delta q'_i(x)$ целесообразно использовать процедуру случайного поиска.

Простой перебор позволяет определить, что для значений $\delta \beta_i$ (ряд 1 в табл.1) характеристики неравномерности распределения $q'(x)$ могут составить $\Delta \max(q'(x)) = 10,8\%$; $\sigma(q'(x)) = 4,86 \text{ Вт/м}^2$ со средним значением $q'_{cp}(x) = 270,2 \text{ Вт/м}^2$.

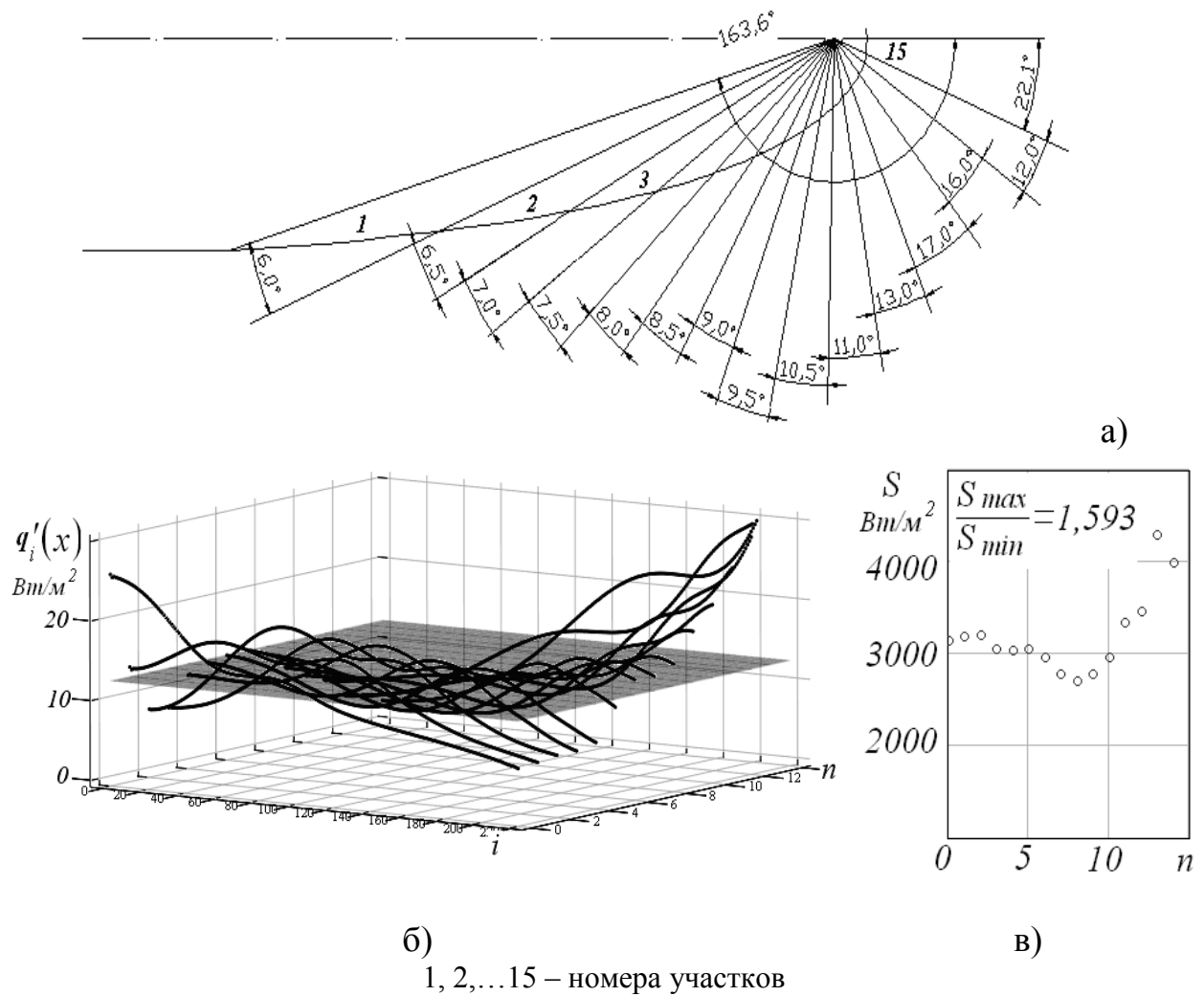


Рис. 6. Поток отраженного излучения участков профиля зеркала

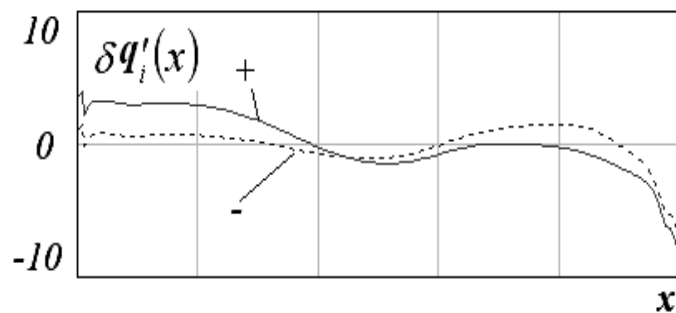


Рис. 7. Распределения коэффициентов чувствительности интенсивности излучения $\delta q'_i(x)$ к углу положения участка зеркала №15

На рис.8 представлены распределения $\Delta q'(x)$ исходного профиля (линия 1), суммарного изменения распределения потока излучения (линия 2) и оптимизированного профиля (линия 3). Случайный поиск в области решения, найденного перебором, позволяет найти комбинацию значений $\delta\beta_i$ (ряд 2 в табл.5), обеспечивающую $\Delta \max(q'(x)) = 9,27\%$ и $\sigma(q'(x)) = 6,06 \text{ Вт/м}^2$.

Углы поворота участков зеркала оптимизированного профиля

Ряд	Участок линии зеркала														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-1	0	-1	0	+1	+2	+2	+2	+2	-1	0	-2	-2	-2	+2
2	-0,1	0	-0,85	0	+0,5	+1,8	+2	+2	+2	-0,9	+0,7	+1,8	+1,9	-2	+2

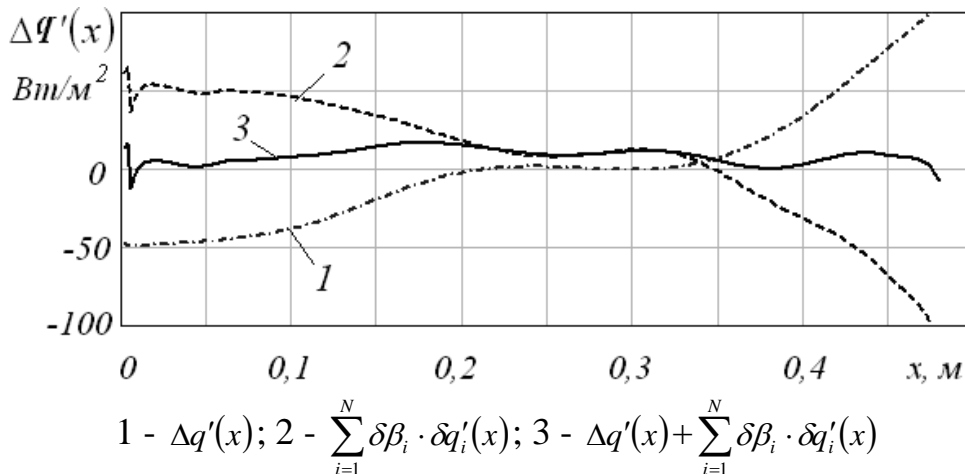
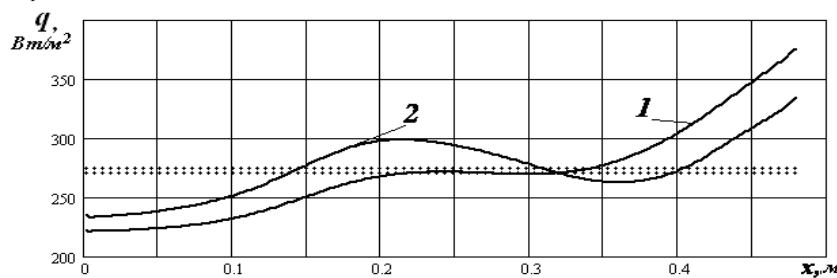


Рис. 8. Распределения отклонений потока излучения

Найденные решения не учитывают взаимного влияния поворота участков профиля отражающей поверхности. Параметры неравномерности распределения оптимизированного профиля получаем решением задачи лучистого теплообмена. Распределение потока излучения профиля представлено на рис.9, параметры неравномерности распределения составляют: $q'_{cp}(x) = 274,15 \text{ Вт/м}^2$; $\Delta \max(q'(x)) = 37,04\%$; $\sigma(q'(x)) = 23,87 \text{ Вт/м}^2$.



1 – исходный профиль, 2 – оптимизированный профиль

Рис. 9. Распределение потока излучения оптимизированного профиля

Изменение углов положения участков профиля зеркала нарушило последовательный порядок распределения отраженных лучей по поверхности облучения, показанный на рис.4, и позволяет установить связь между интенсивностью излучения на участке облучаемой поверхности и количеством лучей отражения, падающих на этот участок. На рис.10 представлено распределение лучей отраженного излучения по поверхности облучения для оптимизированного профиля, построенного в соответствии с

данными табл.1.

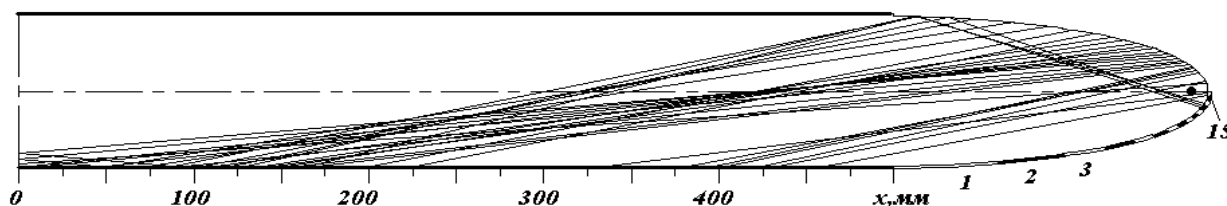


Рис. 10. Распределение лучей для оптимизированного профиля

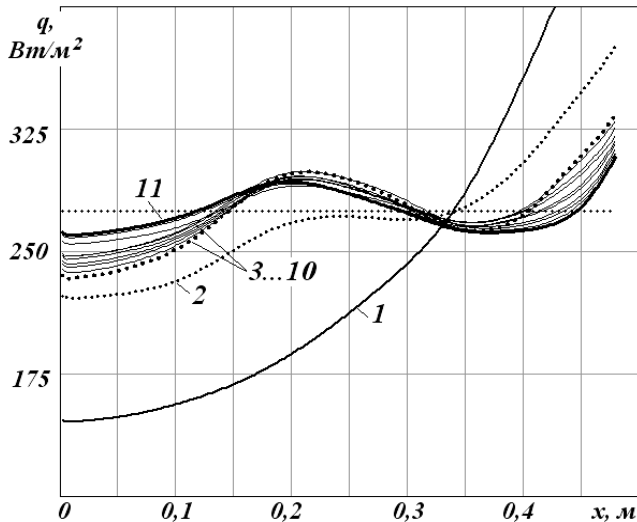
Дальнейшее улучшение решения, полученного случайным поиском, возможно пошаговым изменением угла положения участков профиля. В таблице 2 приведены шаги последовательного изменения положения участков линии зеркала и соответствующие им изменения показателей равномерности распределения $q'(x)$.

Таблица 2

Шаги последовательного изменения положения участков зеркала

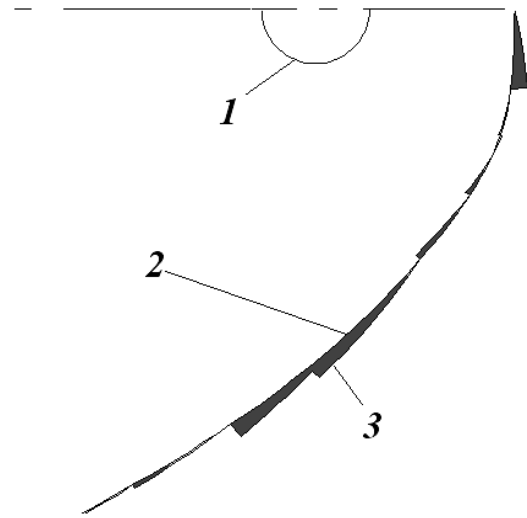
№	Номер участка	Угол поворота, град	$q'_{cp}(x), Вт/м^2$	$\Delta \max(q'(x)), \%$	$\sigma(q'(x)), Вт/м^2$
1	10, 11	+2	274,35	33,94	21,25
2	10, 11	+2	274,40	31,24	19,19
3	9	+2	274,48	28,65	18,08
4	9, 10, 11	+2	274,40	26,65	16,82
5	15	+2	274,49	25,29	16,01
6	12, 13	-1	274,69	23,28	16,43
7	1	+0,5	273,96	21,33	12,36
8	15	+2	274,15	18,91	11,51
9	15	+1	274,28	17,43	11,62
10	13	-2	274,29	16,48	12,05
11	15	+1	274,39	15,36	11,67

На рис.11 представлены распределения $q'(x)$, соответствующие шагам изменения профиля отражающей поверхности, а на рис.12 изменение профиля отражающей поверхности вблизи источника излучения.



1 – диффузно отражающая поверхность; 2 – профиль, оптимизированный алгоритмом функций чувствительности; 3...10 – шаги оптимизации сопоставлением; 11 – оптимизированный профиль (вариант 11 таблицы 2)

Рис. 11. Распределения $q'(x)$, соответствующие шагам изменения профиля отражающей поверхности



1 – поверхность источника излучения; 2 – исходный профиль; 3 – оптимизированный профиль (вариант 11 таблицы 2)

Рис. 12. Шаги оптимизации профиля

Таким образом, выполненная процедура улучшения показателей равномерности распределения потока излучения по поверхности облучения для профиля высотой 100 мм и шириной поверхности облучения 1000 мм позволила уменьшить максимальную нормированную разность потока излучения $\Delta_{\max}(q'(x))$ с 57,6% для расчетного по оптико-геометрической модели до 15,36%, а среднее квадратичное отклонение с 38,13 Вт/м² до 11,67 Вт/м². При этом среднее значение потока излучения выросло с 270,2 Вт/м² до 274,39 Вт/м². Для принятых граничных условий теплообмена на поверхности облучения выполненные изменения геометрии отражающей поверхности позволили существенно уменьшить неравномерность температуры поверхности. Так, для расчетного профиля максимальная нормированная разность температуры $\Delta_{\max}(T(x)) = 1,65\%$, а среднее квадратичное отклонение $\sigma(T(x)) - 1,322$ К при среднем значении $\bar{T}(x) = 316,44$ К. Для оптимизированного профиля $\Delta_{\max}(T(x)) = 0,625\%$, а $\sigma(T(x)) = 0,656$ К, среднее значение $\bar{T}(x) = 316,46$ К.

Дальнейшее повышение степени равномерности распределения потока излучения по поверхности облучения возможно при более дробной разбивке линии зеркала на большее количество участков и повторении шагов оптимизирующего алгоритма.

Выводы. Разработанные алгоритмы последовательной оптимизации профиля отражающей поверхности излучателя позволяют существенно повысить степень равномерности облучения поверхности сушки.

Оптимизация расчетных профилей отражающих поверхностей должна выполняться параллельно обоими алгоритмами. Эффективность применения алгоритмов зависит от характера изменения функций чувствительности: при монотонном изменении функций чувствительности эффективным является алгоритм с использованием функций чувствительности; в случае, если функции чувствительности имеют несколько экстремумов, эффективным является алгоритм сопоставления оптико-геометрической и тепловой моделей лучистого теплообмена.

Список использованных источников:

1. Завалий А.А. Оптико-геометрические модели проектирования отражающих поверхностей устройств инфракрасной суши. // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – Volume 13C. – Lublin 2011. С.150-158.
2. 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.
3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное проектирование / Пер. с англ. Под ред. Е.Г. Гольштейна. М.: Советское радио, 1973. - 312с.

Завалій О.О. Оптимізація робочого об'єму інфрачервоної сушильної камери

Розроблено методи послідовної оптимізації профілю поверхні, що відбиває робочого об'єму пристроїв інфрачервоного сушіння, засновані на зіставленні геометричної та теплової моделей променистого теплообміну і використанні функцій чутливості розподілу променистого теплового потоку по поверхні опромінення до кута положення ділянок лінії, що відбиває.

Виконано оптимізацію профілів відображають поверхонь для лінійного джерела випромінювання, метою якої є забезпечення рівномірного розподілу потоку випромінювання по опромінюваній плоскій поверхні.

Ключові слова: інфрачервоний випромінювач, відбиває поверхня, облучаемая поверхность, оптимізація.

Zavaly A.A. Optimization of the volume of infrared drying chamber

The methods of sequential optimization profile of the reflecting surface of the working volume infrared drying device, based on the comparison of geometrical and thermal modeling of radiative heat transfer and the use of sensitivity functions of distribution of radiative heat flux on the surface of the exposure to the angle position of line sections reflecting surface.

Optimization of profiles reflecting surfaces for the linear light source, which aims to ensure equitable distribution of the radiation flux on the exposed flat surface.

Key words: infrared emitter, the reflective surface, exposed surface, optimization.