

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ ОБЪЕМОВ УСТРОЙСТВ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ

Завалий А.А., к.т.н., доцент

ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет»

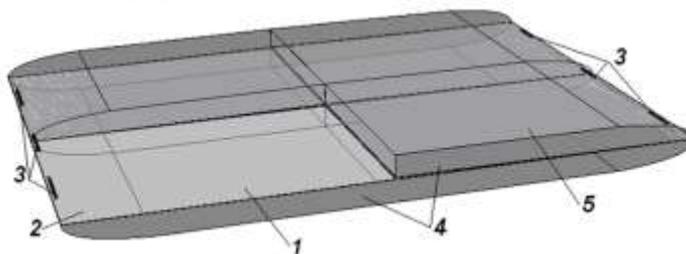
Разработаны трехмерные вычислительные модели анализа теплового состояния рабочих объемов устройств инфракрасной сушки. Особенности моделей являются наличие боковых стенок, ограничивающих рабочий объем устройства, а также конечный размер и местоположение источников излучения в рабочем объеме.

Рассмотрено влияние отражательных способностей боковых стенок и места положения источников излучения на распределение потоков излучения на поверхности продукта сушки. Для выравнивания распределения потока излучения предложено использовать выпукло-вогнутые линзы, размещенные вблизи источников излучения, исследована эффективность использования линз.

Выполнен сравнительный анализ распределения потока излучения на поверхности сушки для двумерных и трехмерных моделей.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, тепловое излучение, моделирование.

Постановка задачи исследования. Основной задачей разработки устройств инфракрасной сушки является обеспечение равномерного распределения потока излучения по поверхности продукта сушки [1, 2]. Рабочие объемы разрабатываемых нами устройств (см. рис.1) представляют собой две расположенные параллельно друг над другом поверхности продукта сушки 1 и 5. Слева и справа поверхности замыкаются профилированными зеркальными отражателями 2, в полости которых размещены цилиндрические источники излучения 3 – линейные лампы накаливания. Спереди и сзади рабочий объем замыкается плоскими боковыми поверхностями 4 [3].



1 – поверхность облучения нижняя; 2 – отражатель; 3 – источник излучения; 4 – боковая поверхность; 5 – поверхность облучения верхняя

Рис.1. Схема рабочего объема устройства инфракрасной сушки

Неравномерность распределения потока теплового излучения вдоль поверхностей 1 и 5 вызвана расположением источников излучения за пределами этих поверхностей слева и справа. Неравномерность распределения теплового излучения поперек поверхностей 1 и 5 вызвана наличием боковых стенок и дискретным размещением источников излучения конечной длины.

Целью настоящей работы является исследование влияния на неравномерность облучения поверхностей сушики отражательных способностей боковых поверхностей, дискретности размещения источников излучения и возможности выравнивания распределения теплового излучения за счет применения линз, установленных возле источников излучения.

Основные результаты. Трехмерные модели лучисто-кондуктивного теплообмена в рабочем объеме сушильного устройства построены для квадратной поверхности облучения стороной 1000 мм, расстояние между поверхностями облучения – 100 мм, 125 мм и 150 мм. Симметрия позволяет сформировать расчетную область как 1/8 рабочего объема. Для расчетных областей приняты следующие параметры дискретизации: конечные элементы – треугольные призмы, сторона основания призмы в поперечном сечении источника излучения – 1 мм, сторона основания призмы в поперечном сечении на остальных границах расчетной области – 4 мм, высота призмы – 50 мм, параметры угловой φ и пиксельной θ дискретизации DO-модели излучения - $\varphi_d = 20$, $\theta_d = 7$, $\varphi_p = 20$, $\theta_p = 7$ [4]. Для указанных параметров сетки количество элементов расчетной области составило 46180 для расстояния между поверхностями 100 мм, 58900 для расстояния 125 мм, 70540 для расстояния 150 мм.

Условия на границах расчетной области: полная (задаваемая) мощность источника излучения – 20000 Вт/м² (157,1 Вт для цилиндра радиусом 2,5 мм и длиной 500 мм); условия внешнего теплообмена 3-го рода – коэффициент теплопередачи 10 Вт/м²·К, температура окружающего пространства 300 К.

При исследовании влияния отражающих свойств боковых поверхностей сравнению подлежали модели, у которых боковые стенки расчетной области задавались как абсолютно черные (тип 1), полностью диффузно отражающие (тип 2) и полностью зеркально отражающие (тип 3). Для сравнения взяты данные расчета двумерных моделей (тип 4) с идентичными условиями на границах расчетной области. Для этих типов моделей в таблице 1 приведены показатели температурной неравномерности на поверхностях облучения.

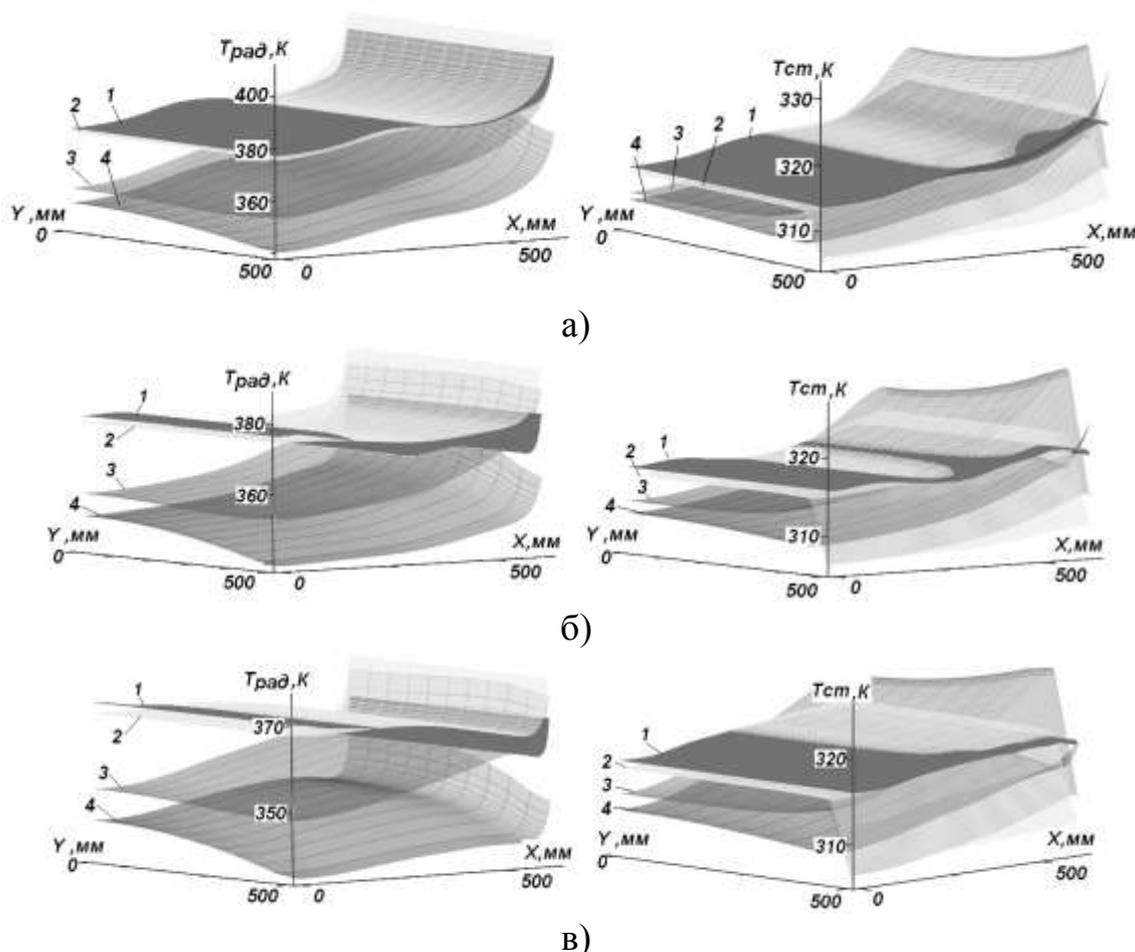
Таблица 1

**Показатели равномерности распределения температуры на
поверхностях облучения**

Тип модели		100 мм			125 мм			150 мм		
		\bar{T}^*	ΔT	σ^2	\bar{T}	ΔT	σ^2	\bar{T}	ΔT	σ^2
1	$T_{рад}$	355,7	15,5	96,6	348,9	9,89	35,45	343,7	7,2	17,8
2		365,9	15,1	133,3	360,1	9,84	54,2	355,3	7,4	26,1
3		383,2	9,9	44,2	374,3	5,06	7,16	366,9	3,46	2,59
4		382,9	7,8	21,6	371,4	2,94	10,27	365,6	3,09	11,07
1	$T_{ст}$	312,7	4,49	13,44	312,3	3,15	7,64	312,4	2,69	5,46
2		316,1	7,5	30,6	316,4	5,47	19,05	316,7	4,48	13,75
3		316,3	3,59	9,07	316,7	1,95	3,44	316,9	1,41	1,85
4		316,4	2,79	6,22	316,8	1,06	1,34	317	0,76	0,67

*- среднее значение температуры на поверхности

На рис.2 представлены поля радиационной $T_{рад}$ и статической $T_{ст}$ температур для рассматриваемых моделей. На рис.3 представлены поля радиационной $T_{рад}$ и статической $T_{ст}$ температур для зеркально отражающих боковых поверхностей моделей с расстоянием между поверхностями облучения 100 мм (поверхность 1), 125 мм (поверхность 2) и 150 мм (поверхность 3).



а) - 100мм; б) – 125 мм; в) - 150мм

Рис.2. Поля радиационной и статической температур

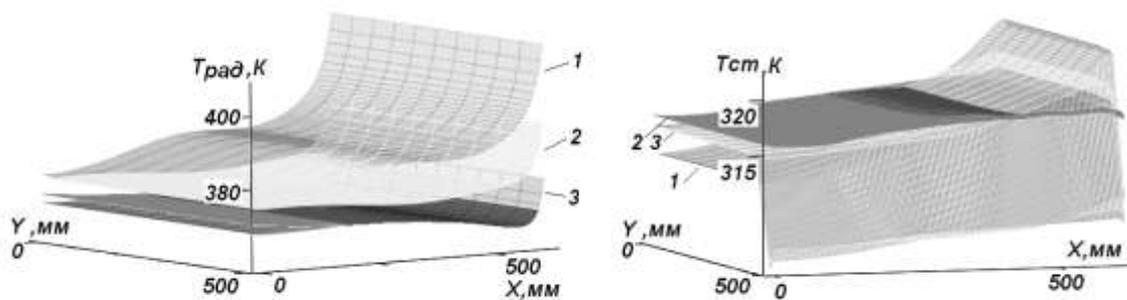


Рис.3. Поля радиационной и статической температур для зеркально отражающих боковых поверхностей

Интегральные энергетические характеристики моделей представлены в таблице 2. В таблице значения q приведены для одной облучаемой поверхности, половины поверхности отражателя и половины боковой поверхности. Удвоенная сумма этих значений составит тепловой баланс мощности источника излучения $q_{ист}$.

Таблица 2

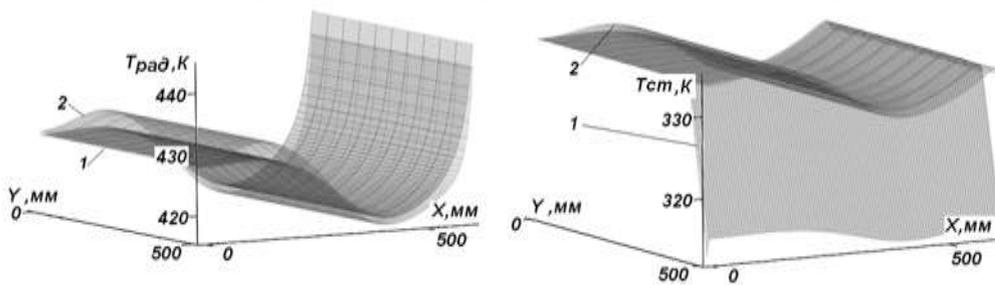
Энергетические характеристики моделей

Тип модели		100 мм	125 мм	150 мм
источник излучения $q_{ист} = 157,1$ Вт				
1, 2, 3	$q_{лучистый}$ Вт	136,9	140,3	142,2
поверхность облучения				
1	q , Вт	50,34	50,54	50,71
2		68	69,4	70,43
3		68,1	69,5	70,5
поверхность отражателя				
1	q , Вт	9,62	8,15	7,06
2		9,56	8,09	7,01
3		9,53	8,04	6,31
боковая поверхность				
1	q , Вт	18,03	19,3	20,2
2		0,39	0,47	0,55
3		0,34	0,43	0,52

Данные таблиц 1, 2 и рис.2 показывают, что наиболее близкие к двумерным моделям распределения температур обеспечивают полностью зеркально отражающие боковые стенки. Применение диффузно отражающих стенок практически не уступает зеркальным по энергетическим характеристикам, при этом является худшим вариантом по неравномерности температурных полей на поверхностях облучения. Применение черных стенок приводит к существенным потерям тепловой мощности источников излучения и увеличивает температурную неравномерность по сравнению с зеркальными боковыми стенками. В соответствии с данными рис.3 и таблицы 2 энергетически предпочтительным является уменьшение расстояния между поверхностями облучения. Вариант расстояния между поверхностями 100 мм обеспечивает наибольшие значения радиационной температуры $T_{рад}$ на поверхности облучения. Это обусловлено уменьшением телесного угла

взаимного облучения источников, зеркал симметрично расположенных излучателей и уменьшением площади боковой поверхности. При этом увеличения термодинамической температуры при уменьшении расстояния между поверхностями от 150 мм до 100 мм не происходит, среднее значение T_{cm} для расстояния 150 мм даже немного выше (317 К против 316,4 К), выше также значение и падающего теплового потока q (50,71 Вт против 50,34 Вт). Такое несоответствие вызвано различной близостью расположения источника излучения и отражающей поверхности. При уменьшении расстояния между поверхностями источник излучения приближается к поверхности отражателя, что приводит к росту кондуктивного потока тепла к поверхности отражателя и уменьшению радиационного потока в рабочий объем устройства.

Лучшие показатели неравномерности распределения температуры у модели с максимальным расстоянием между поверхностями облучения. Причиной такого результата является приближение источника излучения к границе поверхности облучения при уменьшении расстояния между облучаемыми поверхностями. Удаление источника от границы облучаемой поверхности существенно уменьшает температурную неравномерность.



1 – 3D модель; 2 – 2D модель

Рис.4. Поля температур для зеркально отражающей верхней поверхности

Таким образом, анализ влияния отражательных свойств боковых поверхностей рабочего объема с использованием трехмерных лучисто-кондуктивных моделей позволяет сделать следующие выводы. Применение зеркально отражающих боковых стенок обеспечивает тепловое состояние, близкое к двумерной модели, обеспечивающее минимальную температурную неравномерность и минимальные тепловые потери. Энергетически наиболее выгодным решением является рабочий объем с минимальным расстоянием между облучаемыми поверхностями и максимальным удалением источника излучения от поверхности отражателя. К улучшению показателей температурной и тепловой неравномерности на поверхности облучения приводит увеличение расстояния между источником излучения и границей облучаемой поверхности.

Разработанные трехмерные модели используем для анализа теплового состояния поверхности облучения в случае, если верхняя поверхность 5 рабочего объема выполнена зеркально отражающей (см. рис.1). На рис.4 и в таблицах 3, 4 приведены результаты моделирования рабочего объема с

расстоянием между поверхностями 100 мм и зеркальной боковой поверхностью.

Таблица 3

Показатели равномерности распределения температуры

Тип модели		\bar{T} *	ΔT	σ^2
3D	$T_{рад}$	424,4	6,44	25,23
2D		424,2	5,83	33,31
3D	$T_{ст}$	331,3	1,83	4,54
2D		331,3	2,17	6,65

*- среднее значение температуры на поверхности

Таблица 4

Энергетические характеристики моделей

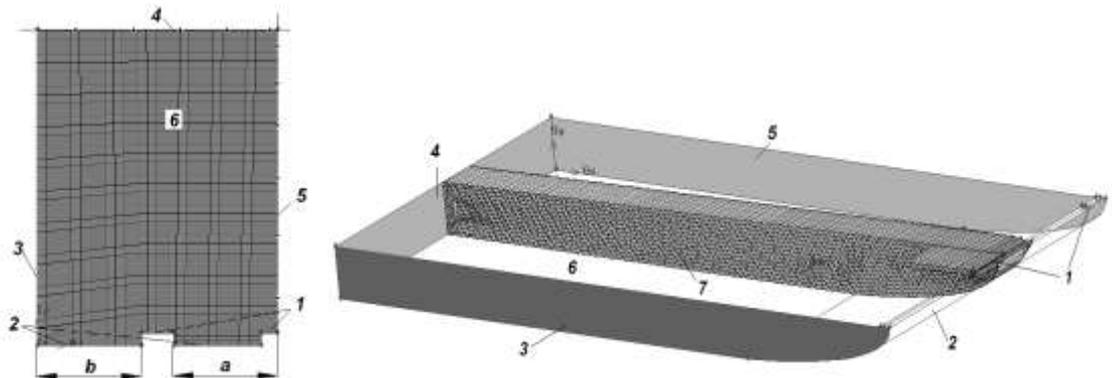
Поверхность	Тип модели	3D	2D
источник излучения	$q_{лучистый}, Вт$	136,9	136,5
	$q, Вт$	157,1	159,3
поверхность облучения	$q, Вт$	133,97	134,1
отражатель	$q, Вт$	19,65	19,9
отражатель верхний	$q, Вт$	1,63	1,76
боковая поверхность	$q, Вт$	0,67	-

Данные таблиц 3, 4 и рис.4 показывают, что применение зеркально отражающей боковой поверхности позволяет сохранить показатели неравномерности и энергетические характеристики, полученные для двумерной модели.

Анализ влияния на неравномерность теплового потока излучения применения линейных источников излучения конечной длины выполним с использованием 2D и 3D моделей лучисто-кондуктивного теплообмена. В реальных конструкциях сушильных устройств возможно использование линейных источников излучения, длина которых составляет 50...100 мм. В этом случае источник излучения представляет собой несколько ламп, установленных на одной оси на некотором расстоянии друг от друга. Чем больше расстояние между лампами, тем большие искажения претерпевает поле потока излучения на поверхности суши. Целью анализа является определение места положения 3-х источников излучения, обеспечивающего минимальное искажение поля теплового потока. 2D модели используем для предварительного определения места расположения ламп. Оценку параметров неравномерности облучения поверхности суши выполним с использованием 3D моделей.

Для построения моделей примем, что лампа представляет собой цилиндр диаметром 5 мм и длиной 50 мм. Рабочий объем представляет собой 2 параллельные поверхности прямоугольной формы размером 1000x750 мм, расположенные друг над другом на расстоянии 100 мм. Поверхности окружены отражателями с установленными в них лампами и плоскими

боковыми поверхностями. Все ограждающие поверхности оптически зеркально отражающие. Примем, что для отражающей поверхности высотой 100 мм удаление лампы от границы поверхности облучения составляет 170 мм по горизонтали. Для описанной геометрии расчетные области для двумерной и трехмерной моделей представлены на рис.5. Варьируемые размеры места положения лампы обозначены на рисунках как a и b . Сетка конечных элементов двумерной модели выполнена четырехугольной со стороной 3 мм, количество элементов - 20788. Сетка трехмерной модели – треугольные призмы. Сторона треугольника в области источника излучения – 1 мм, остальные – 4 мм, высота призмы – 50 мм, количество элементов - 39859.



1 – лампа; 2 – отражатель; 3 – боковая стенка; 4, 5 – плоскости симметрии; 6 – облучаемая поверхность; 7 – сетка конечных элементов

Рис.5. 2D и 3D модели излучения ламп

В двумерной модели плоскость симметрии 4 заменена абсолютно черной стенкой, что позволило получить на ней распределение потока излучения для различных значений a и b . На рис.6, рис.7 и в таблице 5 представлены поля радиационной температуры и параметров равномерности распределения излучения на поверхности 4. В представленных данных величина k – тангенс угла наклона линии регрессии. Минимальным значениям параметров ΔT , σ^2 , k соответствует значение $b = 87,5$ мм.

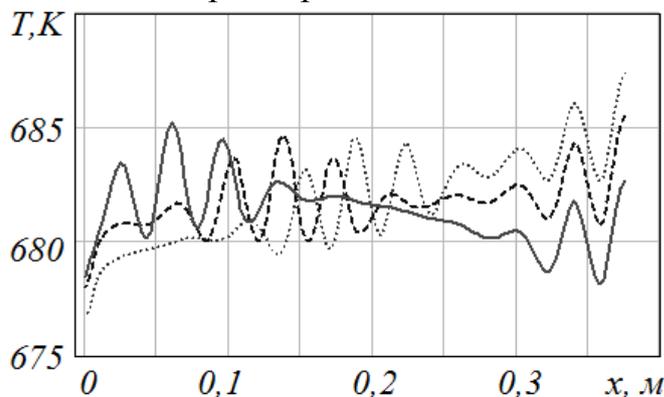


Рис.6. Распределения температуры при различных положениях источника излучения

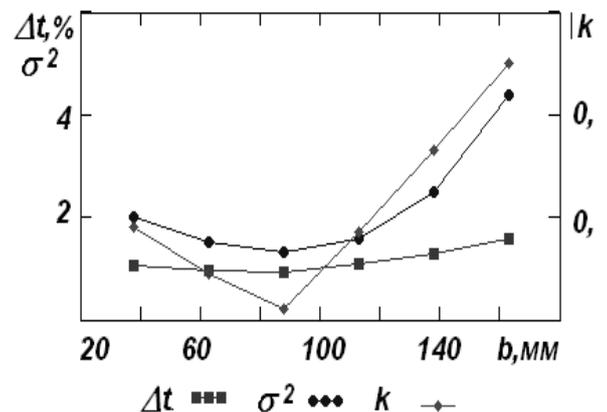


Рис.7. Параметры равномерности распределений температуры

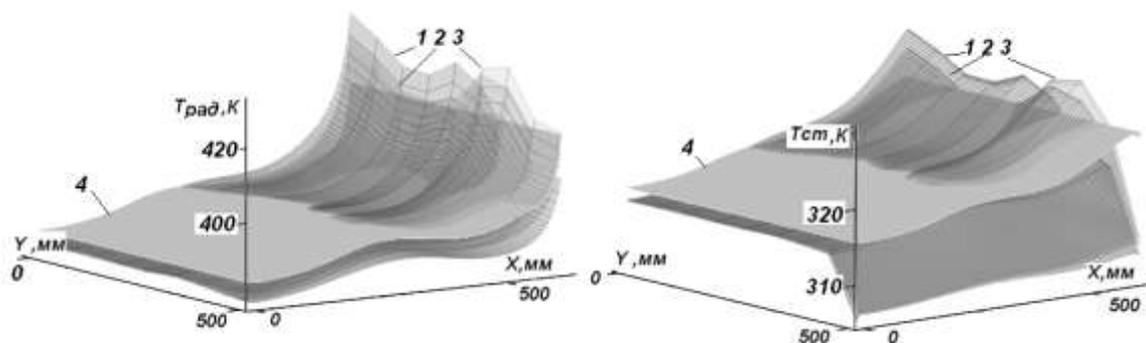
Таблица 5

Показатели неравномерности распределения радиационной температуры

$b, \text{ мм}$	$\bar{T}^*, \text{ К}$	$\Delta T, \%$	$\sigma^2, \text{ К}^2$	К
37,5	681,3	1,063	1,993	-0,018
62,5	681,4	0,963	1,532	-0,009
87,5	681,7	0,915	1,323	0,002
112,5	681,7	1,098	1,585	0,017
137,5	681,7	1,299	2,507	0,033
162,5	681,8	1,569	4,402	0,05

*- среднее значение температуры на поверхности

Трехмерные модели построим для $b = 62,5 \text{ мм}$, $87,5 \text{ мм}$, $112,5 \text{ мм}$ и $162,5 \text{ мм}$. На рис.8 и в таблице 6 представлены поля радиационной температуры и термодинамической температуры и параметров равномерности распределения излучения на поверхности облучения. Для сравнения приведены данные расчета двумерной модели (обозначение 2D на рис.8 и в таблице 6). Данные расчета показывают, что наилучшие показатели неравномерности соответствуют варианту размещения источника излучения при $b = 112,5 \text{ мм}$, то есть трехмерная модель «смещает» место положения источника к боковой стенке.



1 - $b = 62,5 \text{ мм}$, 2 - $b = 87,5 \text{ мм}$, 3 - $b = 112,5 \text{ мм}$; 4 - 2D.

Рис.8. Поля радиационной и термодинамической температуры на поверхности облучения

Таблица 6

Показатели неравномерности распределения радиационной температуры на поверхности облучения

$b, \text{ мм}$	$T_{\text{рад}}$			$T_{\text{ст}}$		
	$\bar{T}^*, \text{ К}$	$\Delta T, \%$	$\sigma^2, \text{ К}^2$	$\bar{T}^*, \text{ К}$	$\Delta T, \%$	$\sigma^2, \text{ К}^2$
162,5	388,4	13,82	58,05	317,9	5,5	12,9
112,5	388,4	12,02	47,1	317,7	4,62	10,44
87,5	388,6	12,43	47,7	317,7	4,92	10,58
62,5	388,5	12,38	49,2	317,6	4,83	10,32
2D	389,9	7,66	21,6	318,4	2,78	6,22

*- среднее значение температуры на поверхности

По сравнению с линейным источником, длина которого совпадает с

длиной облучаемой поверхности (вариант расчета с обозначением 2D), применение трех источников конечной длины приводит к увеличению неравномерности не более чем на 60% для нормированного отклонения и 70...120% для дисперсии.

Уменьшить это отличие можно с помощью оптических deflectоров и линз [5]. Применение рассеивающих излучение линз рассмотрим на примере установки выпукло-вогнутой линзы радиусами $R1 = 120$ мм, $R2 = 105$ мм, $r = 17,5$ мм, ширина $b = 50$ мм, расстояние линзы от оси источника излучения $a = r$, угол $\beta = 90^\circ$ (см. рис.9).

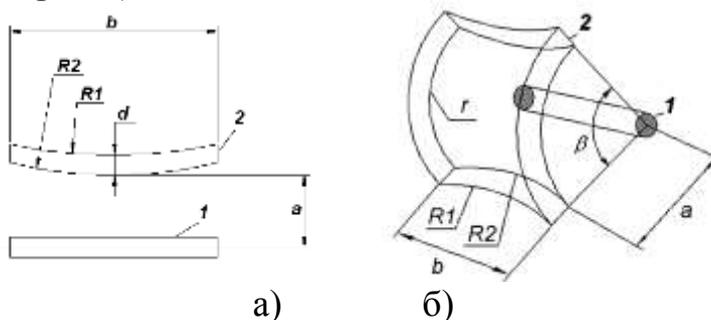
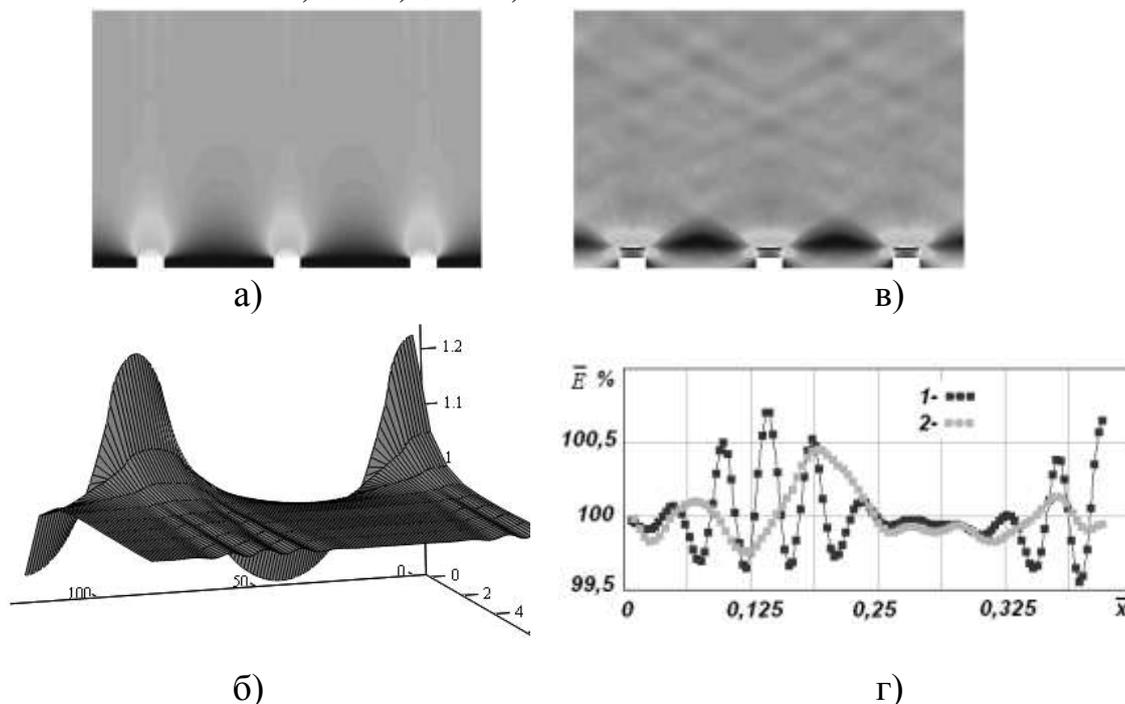


Рис.9. Схема установки и параметры линзы для 2D (а) и 3D (б) моделей

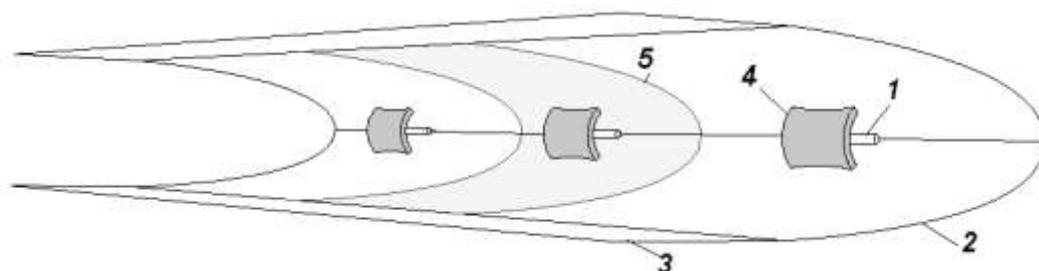
Анализ 2D модели показывает, что установка рассеивающих линз приводит к «выравниванию» потока излучения в «плоскости» рабочего объема. На рис.10 приведены контурные картины интенсивности излучения в расчетной области моделей без линз и с линзами и диаграммы изменения потока излучения относительно среднего значения. Для модели без линз показатели неравномерности составили $\Delta T = 1,152\%$, $\sigma^2 = 1,801 K^2$, для модели с линзами $\Delta T = 0,698\%$, $\sigma^2 = 1,149 K^2$.



а, – модель без линз; б – трехмерная диаграмма для модели без линз (приведены данные до оси симметрии расчетной области); в – модель с линзами; г – распределение потока излучения на границе расчетной области (поз.4 на рис.4.29), 1- модель без линз, 2 – модель с линзами

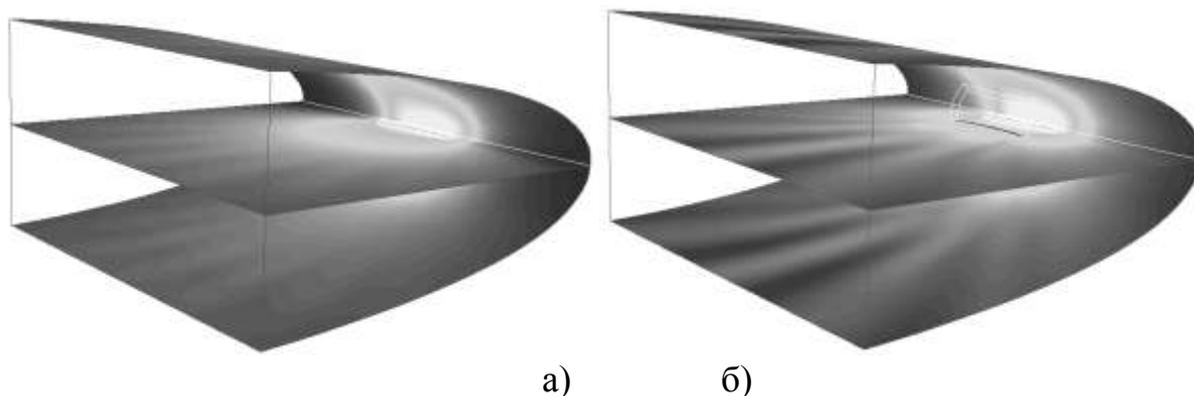
Рис.10. Распределение потока излучения в плоскости моделей

Для оценки возможности распространения полученных результатов моделирования с использованием 2D моделей на трехмерные рабочие объемы выполним трехмерное моделирование лучистого теплообмена для расчетной области, представляющей собой участок профиля отражателя шириной 200 мм с источником излучения (рис.11). Контурные картины распределения потоков излучения в расчетной области 3D модели без линзы и с линзой приведены на рис.12.



1 – источник излучения – лампа; 2 – отражатель; 3 – поверхность сушики; 4 – линза; 5 – участок 3D моделирования

Рис.11. Схема размещения линз в излучателе



а) – модель без линз; б) – модель с линзами

Рис.12. Распределения потоков излучения в расчетной области 3D модели

Таким образом, анализ влияния на неравномерность теплового потока излучения применения линейных источников излучения конечной длины показал, что нелинейность поперек поверхностей сушики увеличивается на 50% по сравнению с источником излучения, длина которого совпадает с длиной поверхности сушики. Применение линз позволяет снизить отличие неравномерностей до 20-25%.

Выводы.

В пределах выбранных геометрических размеров и форм рабочего объема трехмерное распределение потоков излучения подобно двумерному в случае использования зеркально отражающих боковых поверхностей.

Конечный размер источников излучения приводит к увеличению неравномерности распределения потока излучения по поверхности сушики,

снизить эту неравномерность позволит использование выпукло-вогнутых линз, устанавливаемых возле источников излучения.

Список использованных источников

1. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. М.: Госэнергоиздат, 1955. – 229с.
2. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М.: пищевая промышленность, 1966. – 407 с.
3. Завалий А.А., Снежкин Ю.Ф. Устройства для инфракрасной сушки термолабильных материалов. Промышленная теплотехника, 2013, т.35, №2. – С.23-29.
4. 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.
5. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. - 3-е изд. – М.: Знак, 2006. – 972 с.

Завалий О.О. Аналіз теплового стану робочих об'ємів пристроїв інфрачервоної сушки з допомогою комп'ютерних 3D-моделей

Розроблено тривимірні обчислювальні моделі аналізу теплового стану робочих об'ємів пристроїв інфрачервоного сушіння. Особливостями моделей є наявність бічних стінок, що обмежують робочий об'єм пристрою, а також кінцевий розмір і місце розташування джерел випромінювання в робочому об'ємі. Розглянуто вплив відбивних здібностей бічних стінок і місця положення джерел випромінювання на розподіл потоків випромінювання на поверхні продукту сушіння. Для вирівнювання розподілу потоку випромінювання запропоновано використовувати опукло-увігнуті лінзи, розміщені поблизу джерел випромінювання, досліджено ефективність використання лінз.

Виконано порівняльний аналіз розподілу потоку випромінювання на поверхні сушки для двовимірних і тривимірних моделей.

Zavaliy A.A. Analyzing thermal equilibrium of effective volumes of infrared drying devices via 3D computer models

Three-dimensional computational models have been developed to analyze thermal equilibrium of effective volumes of infrared drying devices. Peculiarities of the models are as follows: side panels limiting the effective volume of the device as well as a finite size and location of radiation sources in the effective volume. The influence of reflective capacities of the side walls and location of radiation sources on distribution of radiation flux along the surface of the drying product has been reviewed. It was suggested to use convex-concave lenses located near radiation sources for adjustment of radiation flux distribution; efficacy of lenses use has been investigated.

Comparative analysis of radiation flux distribution along the drying surface has been performed for two-dimensional and three-dimensional models.

Key words: infrared drying device, thermal radiation, modeling.

Ключові слова: інфрачервона
сушка, теплове випромінювання,
моделювання.