

тивное противоборство факторов микроволнового воздействия поля, способствующих и препятствующих реализации эффекта избирательности нагрева компонентов виноматериалов, основывается на использовании реальных экспериментальных данных.

2. Статистическая модель, используемая для получения оценок показателя избирательности, является более адекватной, чем известные, и удобной для практического решения задач микроволновой инактивации микрофлоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянчук Б.А. Принципы и применения микроволнового нагрева. Монография. - Одесса: «Черноморье». - 2004. - 520 с.
 2. Гулиев Ш.Р. Разработка технологии и оборудования для инактивации микрофлоры виноматериалов путем микроволнового воздействия // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н. - НИИВиВ «Магарач». - 125 с.
 3. Конев С.В., Руденок А.Н. Проницаемость и теплоустойчивость цитоплазматических мембран дрожжевых клеток // Биофизика мембран. - Каунас: - 1973. - С. 340-343.
 4. Билобров В.М., Хиженко П.К. Об информационном и энергетическом влиянии электромагнитного излучения на бактериальные клетки // Электронная обработка материалов. - 1993. - С. 63-67.
 5. Кучма Т.Н., Самойленко И.И., Остапенков А.М. Выживаемость микроорганизмов при кратковременной обработке в СВЧ поле дециметрового диапазона // Электронная обработка материалов. - 1989. - № 3. - С. 65-67.
 6. Игнатов В.В., Панасенко В.И., Пиденко А.П., Радин Ю.П., Шендеров Б.А. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку. - Саратов: СГУД. - 1978. - 80 с.
 7. Гриневич А.Г., Босенко А.М. Техническая микробиология. - Минск. Высшая школа, 1986. - 168 с.
- УДК 631.365:535.317.2:535-1

ЗАВАЛИЙ А.А., канд. техн. наук, доцент, ЯНОВИЧ И.В., ассистент

Южный филиал Национального университета биоресурсов и природоиспользования Украины «Крымский агротехнологический университет», г. Симферополь.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТА СУШКИ В ИНФРАКРАСНОЙ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Разработан метод формирования геометрии рабочего объема инфракрасной сушильной камеры, обеспечивающий равномерное тепловое воздействие на продукт сушки. Выполнены расчетные и экспериментальные исследования влияния формы отражателя ИК излучателя на равномерность облучения поверхности лотка сушильной камеры.

Ключевые слова: сушильная камера, инфракрасное излучение, отражающие поверхности.

The method of forming of geometry of the swept volume of infra-red drying chamber, which provides the even thermal affecting product of drying, is developed. Calculation and experimental researches of influencing of form of reflector are executed IR emitter on evenness of irradiation of surface of tray of drying chamber.

Keywords: drying chamber, infra-red radiation, reflecting surfaces.

Одним из главных недостатков устройств инфракрасной сушки является высокая степень неравномерности теплового потока излучения, падающего на облучаемую поверхность [1]. Неравномерность обусловлена малыми геометрическими размерами источника излучения по отношению к облучаемой поверхности. Интенсивность излучения от источника малых размеров на элементарную площадку поверхности может быть определена по формуле [2], отражающей существенную неравномерность облучения:

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

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

Для выравнивания теплового воздействия на поверхность применяют технические решения, увеличивающие площадь поверхности источника излучения – используют источники излучения больших физических

3. Метод позволяет прогнозировать (по ограниченной совокупности экспериментальных данных) реальный уровень избирательности микроволновой обработки среды, который можно достигать при известном уровне интенсивности воздействия поля, а также определять требуемую интенсивность воздействия поля для достижения заданного уровня эффекта избирательности воздействия на компоненты диэлектрической среды.

Поступала 11.2010

ких размеров, большое количество источников малого размера, источники с отражателями [3, 4]. Применение источников излучения большого размера позволяет уменьшить предельное значение угла φ в формуле (1), а также снизить температуру источника. Недостатком таких источников излучения является значительная доля конвективно-кондуктивного теплового потока от источника в окружающую среду, достигающая по нашим оценкам 40% общей тепловой мощности. Применение высокотемпературных источников малого размера, оснащенных отражающими поверхностями, также позволяет существенно выровнять тепловое воздействие, благодаря распределению теплового потока излучения по площади отражателя. При этом их конвективно-кондуктивные потери существенно меньше и составляют не более 10% тепловой мощности.

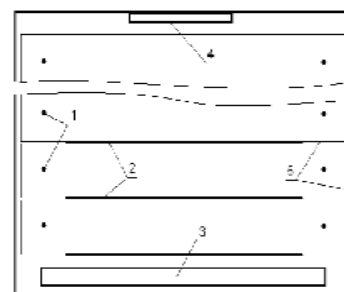


Рис. 1. ИК сушильная камера: 1 – источник излучения; 2 – сетчатый лоток с продуктом сушки; 3 – устройство забора воздуха; 4 – вытяжной вентилятор; 5 – отражатель

Нами разрабатывается инфракрасная камера для сушки продуктов сельскохозяйственного производства (овощей, плодов, трав, мяса, рыбы и др.), в которой поверхностью, принимающей излучение, служат лот-

ки прямоугольной формы с размещенным на них продуктом сушки. Источниками инфракрасного излучения служат излучатели, включающие в себя линейные лампы накаливания, окруженные отражателями (см. рис.1) [5]. Особенностью компоновки камеры является размещение излучателей за пределами межлоточного пространства. Такое конструктивное решение позволяет удалить источник от поверхности и равномерно распределить поток излучения с помощью отражающих и заграждающих «теневых» поверхностей, входящих в состав отражателя.

Очевидно, что равномерность распределения потоков излучения по поверхности лотка определяется геометрическими параметрами взаимного расположения лотка, источника излучения и отражателя, а также формой, местом расположения и свойствами отражающих и «теневых» поверхностей.

Для разработки конструкции излучателя, обеспечивающего равномерное тепловое воздействие на поверхность лотка сушильной камеры, нами выполнены расчетные и экспериментальные исследования влияния формы отражателя на равномерность облучения поверхности.

Объектом исследования является межлоточное пространство сушильной камеры, ограниченное излучателями и боковыми стенками сушильной камеры.

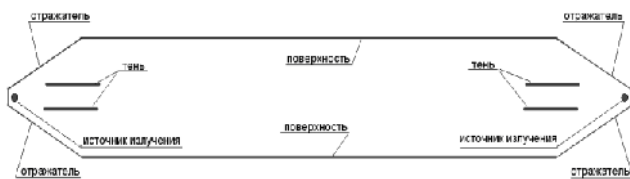


Рис. 2. Система тел излучатель – поверхность

Для расчетного анализа теплового состояния межлоточного пространства построена тепловая модель расчетной области замкнутой системы «излучатель - поверхность», образованной диффузно-серыми поглощающими поверхностями лотков и серыми диффузно и зеркально отражающими поверхностями отражателей (см. рис.2). 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, а также внутренние отражатели или «тени», назначение которых – перераспределить тепловые потоки излучения внутри замкнутой области. Внутренняя область заполнена газообразной средой.

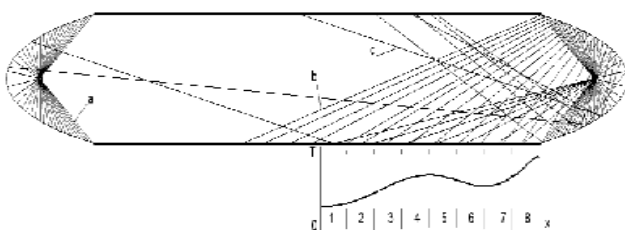


Рис. 3. Оптическая схема излучения: а – лучи источника излучения; б – лучи первого отражения; с – лучи двойного отражения

Тепловая модель включает в себя стационарные уравнения теплового баланса элементов системы [6]:

уравнение теплового баланса для бесконечно малого участка поверхности твердого тела в условиях сложного теплообмена:

$$\lambda \cdot grad(T_W) + \alpha(T_W - T_f) + \varepsilon_W \sigma T_W^4 - \sum F_{W-j} q_{W,j} = 0, \quad (2)$$

где T_W – температура поверхности, T_f – температура газа вблизи поверхности; λ – коэффициент теплопроводности твердого тела с изотропными тепловыми свойствами, α – коэффициент теплообмена между стенкой и прилегающим газом, ε_W – интегральная степень черноты поверхности; σ – постоянная Стефана-Больцмана; F_{W-j} – угловой коэффициент удаленной изотермической поверхности, $q_{W,j}$ – интенсивность (плотность потока) излучения удаленной изотермической поверхности:

$$q_{W,j} = \varepsilon_j \sigma T_j^4 - \sum F_{j-k} q_{j,k}, \quad (3)$$

где $q_{j,k}$ – интенсивность (плотность потока) излучения удаленной изотермической поверхности для $k \neq j$. В формуле (2) четвертое слагаемое суммы определяет лучистый поток тепла от окружающих поверхностей, а также от излучающего изотермического объема газа к рассматриваемому участку поверхности; уравнение теплового баланса элементарного объема газа:

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h, \quad (4)$$

где E – энергия элементарного объема; ρ – плотность газа, p – давление газа, \vec{v} – скорость движения газа, T – температура газа, $k_{eff} = k + k_t$ – эффективный коэффициент теплопроводности (сумма коэффициентов кондуктивной теплопроводности и турбулентной теплопроводности), \vec{J}_j – диффузия j-го компонента смеси газов, $\vec{\tau}_{eff}$ – коэффициент трения в газе, S_h – объемный источник тепла, например, в результате химической реакции или излучения. Левая часть уравнения (4) представляет изменение энергии в элементарном объеме газа при движении последнего со скоростью \vec{v} . Это изменение вызывается теплопроводностью, диффузией и диссипацией энергии трением, представленными первым членом правой части уравнения. Слагаемое S_h уравнения (4), представляющее энергию излучения, определяется уравнением переноса излучения через элементарный объем поглощающего, излучающего и рассеивающего газа температурой T из положения \vec{r} в направлении \vec{s} :

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (5)$$

где \vec{r} – вектор положения; \vec{s} – вектор направления; \vec{s}' – рассеивание вектора направления; s – длина пути; a – коэффициент поглощения; n – коэффициент преломления; σ_s – коэффициент рассеивания; $I = S_h$ – интенсивность излучения; T – местная температура; Φ – фазовая функция – индикатриса рассеяния; Ω' – телесный угол; $(a + \sigma_s)s$ – оптическая толщина или непрозрачность среды. Левая часть уравнения (5) содержит

изменение интенсивности излучения при прохождении через элементарный объем газа вдоль вектора направления \vec{S} и количество поглощенной и рассеянной энергии излучения при прохождении через элементарный объем. В правой части – сумма энергии излучения элементарного объема температурой T и рассеянной энергии этого объема в полном угле (во всех направлениях). Уравнение справедливо для газовых сред с изотропными свойствами излучения.

Решением системы уравнений (2) и (4) являются значения температур и тепловых потоков во всех точках области решения, включая границы. Количественными критериями оценки качества формы отражателя приняты максимальная нормированная разность температур на принимающей излучение поверхности Δt_{max} :

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

где t_{max} – наибольшее значение температуры на поверхности, t_{min} – наименьшее значение температуры на поверхности, t_{mean} – среднее значение температуры на поверхности; а также дисперсия значения температуры на принимающей излучение поверхности: σ^2 . Решение представленной системы уравнений получаем численно методом конечных элементов [6].

Для формирования отражающих и «теневых» поверхностей использована оптическая модель межлоточного пространства, основанная на законе полного отражения [7]. Поверхности лотка и отражателя представлены участками, для которых строятся падающие, а для отражателя и отраженные лучи. Изменением угла положения участка отражателя формируется поток излучения на поверхность лотка (см. рис.3). Профиль температуры на поверхности лотка получаем решением тепловой модели.

Решение тепловой модели выполнено для 27 вариантов геометрии отражающей поверхности (см. рис.4а), из которых отобраны два профиля параболической и гиперболической кривизны, имеющие наилучшие показатели качества. Степень равномерности теплового воздействия на поверхность лотка для выбранных профилей улучшалась изменением угла положения участков профиля и установкой «теней» вблизи источника излучения. В результате сформированы профили отражателей, обеспечивающие тепловую равномерность с параметрами $\Delta t_{max}=0,77\%$ и $\sigma^2=0,319$ (см. рис.4б). Отражающие поверхности (поз.1 на рис. 4б) должны обладать свойствами зеркального отражения, а «тени» (поз.2) – диффузного отражения.

Совместное применение оптической и тепловой модели системы «излучатель - поверхность» позволило разработать методику проектирования «изотермического» профиля, обеспечивающего равномерное тепловое воздействие на поверхность лотка. В основу методики положено требование равенства тепловых потоков, падающих на элементарную площадку поверхности от источника излучения и отражателя. Равенство выполняется при условии, следующем из уравнения (1):

$$\cos(\beta) + \cos(\gamma) = \cos(\alpha), \quad (6)$$

где α - наибольший угол падения излучения от источника на край поверхности, β - угол падения излучения от источника на элемент поверхности; γ -

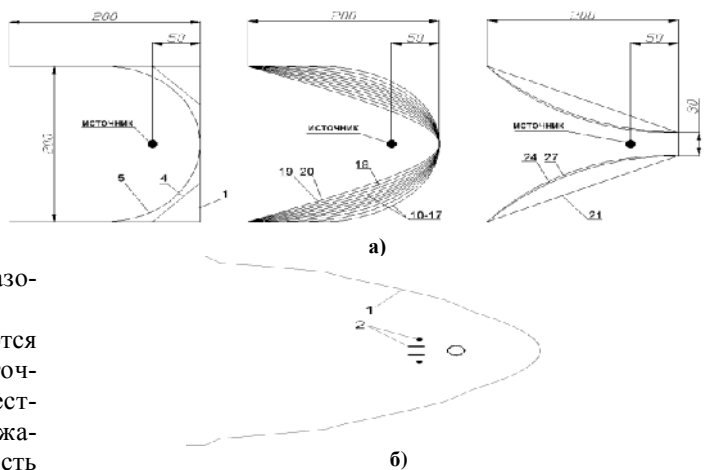


Рис. 4. Геометрии отражающих поверхностей

угол падения излучения от излучателя на элемент поверхности (см. рис.5). Условие (6) удовлетворяет требования равномерности, если поток излучения от источника попадает только на половину принимающей поверхности.

Выражение (6) позволяет также определять геометрические размеры межлоточного пространства (А, В, С, Н на рис.5), обеспечивающие возможность построения «изотермического» профиля, задавая, например, величины А и Н. Результат построения «изотермического» профиля приведен на рис.6. Здесь же приведены графики изменения температуры для

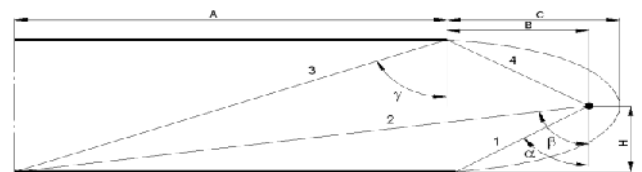


Рис. 5. Схема построения «изотермического» профиля: 1 – луч, падающий от источника на край лотка; 2 – луч, падающий от источника на середину лотка; 3 – луч, падающий от отражателя на середину лотка

«изотермического» профиля и профиля, изображенного на рис.4б. Параметры неравномерности для «изотермического» профиля составили $\Delta t_{max}=0,604\%$ и $\sigma^2=0,338$. Наблюдаемая в «изотермическом» профиле неравномерность вызвана погрешностями построений, невыполнением условия равенства величины $d\omega$ для всех участков профиля, а также наличием излучения от источника, попадающего на вторую половину принимающей поверхности и противоположный отражатель.

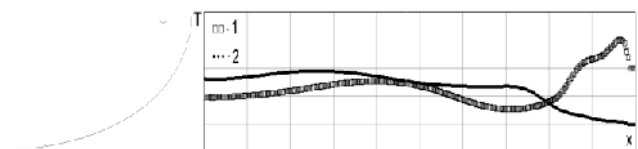


Рис. 6. «Изотермический» профиль: 1- поле температуры для профиля на рис.4б; 2- поле температуры для «изотермического» профиля

Результаты двумерного моделирования расчетной области сопоставлены с результатами расчета для трехмерной модели, в которой боковые стенки расчетной области заданы диффузно отражающими.

На рис.8 представлены пространственное поле

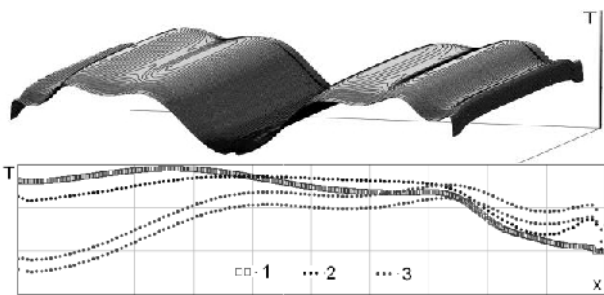


Рис. 7. 3D-поле температуры для «изотермического» профиля: 1– 2D-поле температуры, сетка 1мм; 2 – 2D-поле температуры, сетка 4мм; 3– 3D-поле температуры, сетка 4мм

температуры на принимающей поверхности и поля температуры на принимающей поверхности для двумерной (2D) и трехмерной (3D) задач.

На графике (рис. 7) 3D-поле температуры отражено двумя кривыми, ограничивающими «коридор» значений для всех расчетных сечений трехмерной задачи. Параметры неравномерности для трехмерной

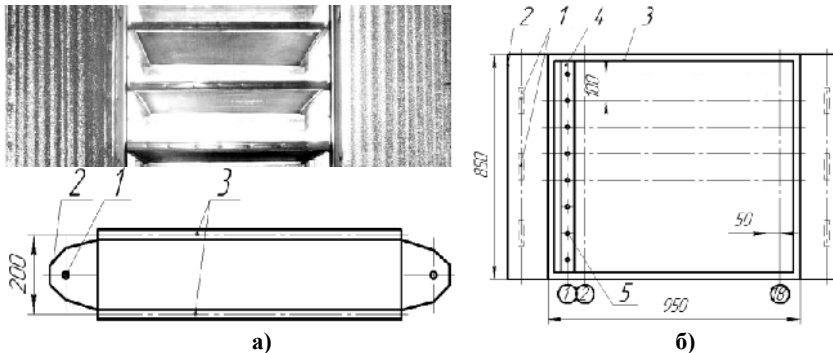


Рис. 8. Общий вид и схема межлоткового пространства сушильной установки (а); схема установки термодпар (б): 1 – ИК лампа; 2 – отражатель; 3 – лотки; 4 – «гребенка»; 5 – термодпара; ① - ② - положение «гребенки»

задачи составили $\Delta t_{\max} = 0,631\%$ и $\sigma t^2 = 0,284$. Причинами, вызывающими отличие в характере температурных кривых 2D и 3D моделей являются следующие: а) к изменению профиля температуры приводит изменение параметров дискретизации задачи (чем больше размер сетки конечных элементов, тем грубее результат. Для трехмерного решения параметры дискретизации пришлось ухудшить из-за аппаратных ограничений вычислительной техники); б) к изменению профиля температуры приводит пространственный характер излучения линейного источника, отличающийся от излучения источника точечного; в) влияние на профиль температуры оказывает наличие боковых стенок. Результаты сравнения полей температуры для двумерной и трехмерной задач показывают, что поля температуры хорошо согласуются. Проектирование профилей с использованием двумерных моделей позволяет получить трехмерные распределения потоков излучения с высокими показателями равномерности.

Экспериментально поля температуры на поверхности лотка при использовании отражателей различной геометрии определены в инфракрасной сушильной камере (рис.8а).

В камере рабочим объемом 2 м^3 на расстоянии 200мм друг от друга установлены сетчатые лотки размером 950x850мм, за пределами рабочего простран-

ства установлены инфракрасные излучатели с различной формой отражающих поверхностей (рис.8).

В качестве средства измерения использована система автоматической регистрации температуры. Рабочий диапазон измерений температуры - $0-300^\circ\text{C}$, разрешающая способность - $0,1^\circ\text{C}$, погрешность измерения - $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Экспериментальные данные передаются на ПК с интервалом 30с и регистрируются специализированным программным обеспечением.

Термопары располагались на поверхности лотка параллельно излучателю на расстоянии 100мм друг от друга (рис. 9б). Для позиционирования термопар изготовлена «гребенка» (рис. 9а) - П-образный профиль с трубками для фиксации термопар. «Гребенка» перемещалась по поверхности лотка с шагом 50 мм. Чувствительный элемент термопары (спай и прилегающий участок проводов) выполнены в виде петли (рис. 9б). Такая форма позволяет исключить сток тепла по термоэлектродным проводам во время измерения.

В экспериментах использовались 3 формы отражателей: с обратной кривизной поверхности (рис. 10а), «зубчатый» (рис. 10б) и «изотермический» (рис. 10в). Критерием отбора отражателей для исследования являлась наибольшая равномерность температуры на поверхности лотка. Отражатель с обратной кривизной поверхности был предложен нами ранее в работе [8], «зубчатый» отражатель обеспечивал наименьшую неравномерность при расчете задачи в двухмерной постановке, а «изотермический» - в трехмерной.

Эксперимент проводился по следующей программе: 1) сетчатые лотки накрывались плотной тканью для уменьшения влияния на температуру

термопары естественной конвекции; 2) «гребен-

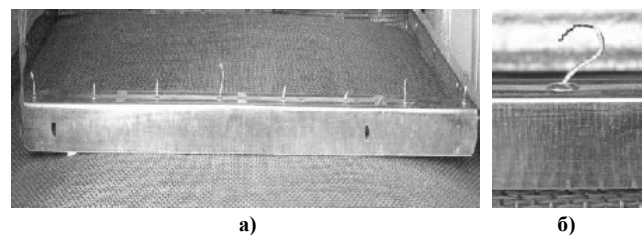


Рис. 9. «Гребенка» для установки термодпар на лотке (а) и чувствительный элемент термодпары (б)

ка» устанавливалась в положении 1 (см. рис. 9б) и выдерживалась в течение 20 минут до установления постоянства показаний термопары; 3) измерения в положениях 2-18 проводились с интервалом 7 минут; 4) для проверки симметричности поля температуры на поверхности лотка измерения выполнялись в обратном порядке.

Для каждого отражателя выполнено 30 – 40 экспериментов. Оценивалась максимальная нормированная разность температур на поверхности нагрева Δt_{\max} , а также дисперсия значения температуры σt^2 .

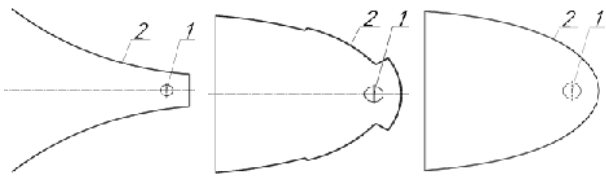


Рис. 10. Отражатель обратной кривизны (а), «зубчатый» (б), «изотермический» (в):
1 – ИК лампа, 2 – отражающая поверхность

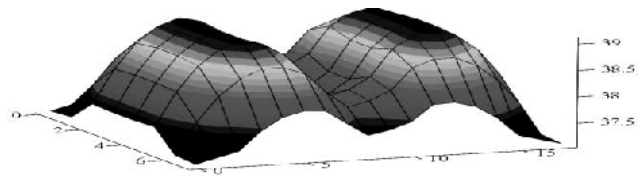


Рис. 12. Поле температуры для «изотермического» профиля (рис.11в)

Таблица 1
Параметры неравномерности температуры на поверхности нагрева

Профиль отражателя	Расчет		Эксперимент	
	Δt_{\max} (%)	σ^2	Δt_{\max} (%)	σ^2
Обратной кривизны	6,27	8,20	17,03	11,48
«Зубчатый»	2,45	2,26	10,39	4,42
«Изотермический»	0,63	0,28	2,16	1,34

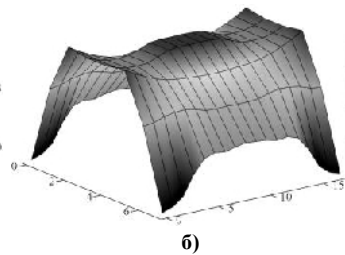
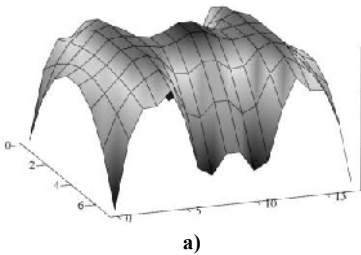


Рис. 11. Поля температур для профилей рис. 10а (а) и рис. 10б (б)

Здесь под понятием температура на поверхности нагрева мы понимаем температуру термодомы известной степени черноты, которая нагревается излучением ИК лампы, излучает тепло в более холодные стен-

ки камеры, а также охлаждается окружающим воздухом. Поля температуры на поверхности нагрева для излучателей с отражателями обратной кривизны, «зубчатого» и «изотермического» профиля представлены на рис. 11а, 11б, и 12.

Расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом (см. таблицу).

Таким образом, разработан метод построения профиля отражающей поверхности, обеспечивающей равномерное тепловое воздействие на облучаемую поверхность. Предложены конструкции отражателей («зубчатый» и «изотермический» профили), обеспечивающие минимальные значения параметров неравномерности Δt_{\max} и σ^2 . Эффективность конструкций отражающих поверхностей подтверждена экспериментально.

Поступала 10.2010

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В.М. Генераторы лучистой мощности. Ленинград: Ленинградский электротехнический институт, 1960. - 280с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. Пер с англ. М.: Мир, 1975. - 934с.
3. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. - М.: Агропромиздат, 1988. - 272с.
4. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. М.: Госэнергоиздат, 1955. - 229с.
5. Патент на корисну модель №39987 «Сушильний пристрій». / Завалий О.О., Янович І.В. та ін.
6. E. H. Chui and G. D. Raithby. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method. Numerical Heat Transfer, Part B, 23:269-288, 1993.
7. Основы оптики. Борн М., Вольф Э. Перевод с английского. М: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970. - 856с.
8. 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.

УДК 681.51

УЛЦЬКА О.О., аспірант, СТОПАКЕВИЧ О.А., канд. техн. наук, доцент,
ТОДОРЦЕВ Ю.К., д-р техн. наук, професор
Одеський національний політехнічний університет

ВСЕРЕЖИМНЕ УПРАВЛІННЯ БАГАТОКОРПУСНИМИ ВИПАРНИМИ УСТАНОВКАМИ

Розроблено всережимний багатомірний нелінійний регулятор для автоматичної системи управління багатокорпусною випарною установкою цукрового виробництва, що забезпечує її стабільну роботу при зміні навантаження та дії різноманітних збурень.

Ключові слова: всережимний регулятор, багатокорпусна випарна установка.

A multimode multivariable nonlinear regulator for automatic control system of sugar industry multiple-effect evaporator is developed. It provides control systems stable work with loading variations and various disturbances.

Keywords: all-speed governor, multicabinet-type evaporator system.

Як було показано у [1], автоматизована система управління багатокорпусною випарною установкою цукрового виробництва на базі багатомірних нелінійних регуляторів в окрузі технологічного режиму повністю відповідає технологічним вимогам. Однак, завдяки використанню нелінійної математичної моделі

існує можливість розширити діапазон навантажень випарної установки, забезпечивши її стабільну роботу з алгоритмом нелінійного управління.

Необхідність переходу на нові режими роботи випарної установки, а отже і заводу в цілому, може бути зумовлена багатьма факторами. З одного боку, згідно з нормами технологічного проектування цукробурякових заводів розрахункова тривалість роботи заводу має бути не менше 100 діб. З іншого боку можлива нестача сировини, наприклад, з-за неврожаю або через вину постачальників. Для компенсації нестачі буряку у збірник соку перед установкою додають аміачну воду і тим самим збільшують використання енергоносіїв для випаровування доданої кількості води. Крім того, перехід на новий режим роботи заводу може бути обумовлений і соціальними