

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИК-НАГРЕВА ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК

**Поперечный А.Н., д.т.н., проф., Жданов И.В., к.т.н., доц.,
Миронова Н.А., ст. преподаватель**

*(Донецкий национальный университет экономики и торговли имени
Михаила Туган-Барановского)*

В статье приведены теоретические основы ИК-нагрева, представлены аналитические зависимости, описывающие процесс нагрева лучистой энергией тела в виде шара.

Постановка задачи. Сбережение теплоты и энергии, различных видов топлива поднято, в настоящее время, на уровень государственной политики, получившей название энергосберегающей. Эта политика выступает как мощный рычаг совершенствования топливно-энергетического комплекса страны, и как один из важнейших факторов, стимулирующий дальнейший общий прогресс промышленного производства. Указанное относится и к пищевым отраслям промышленности, решение задачи возможно только на основе прогрессивных энерго-и ресурсосберегающих, экологически совершенных технологий и оборудования.

Одним из наиболее энергоемких процессов в пищевой технологии является сушка [1,2].

В настоящее время существуют различные способы сушки отходов плодовоовощного сырья, с учетом их особенностей и требований к технологическому процессу. Как известно [3,4] ИК-нагрев является наименее энергозатратным процессом тепловой обработки продуктов.

Плодовые косточки являются ценным сырьем для вторичной переработки т.к. компоненты, из которых они состоят, используются в фармакопейной, парфюмерной, пищевой и др. отраслях промышленности.

В настоящее время отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования нестационарного тепломассообмена при сушке ИК-излучением плодовых косточек как двухслойной структуры с учетом их формы, физических и теплофизических особенностей.

Однако для получения качественного продукта при минимальных затратах производства требуется более детальный подход к исследованию процессов, происходящих при тепловой обработке.

В связи с этим актуальной является задача аналитического исследования процесса сушки плодовых косточек, с целью расчета кинетики сушки косточек ИК-лучами, температуры, продолжительности и удельных расходов теплоты при инфракрасном излучении. Полученные результаты в дальнейшем позволят выбрать излучатели с соответствующими энергетическими характеристиками, удовлетворяющие требования производства.

Цель исследований. Математическое описание процесса нагрева лучистой энергией тела в виде шара. Проверка составленной теоретической модели на согласованность с экспериментальными данными.

Основные материалы исследований. С целью изучения процесса нагрева лучистой энергией тела в виде шара проведены исследования для установления радиального распределения температуры в любой момент времени и удельного расхода теплоты при нагревании шара (косточек вишни, черешни, а также абрикоса и сливы) по всей поверхности при постоянной плотности лучисто потока ($q=const$).

Задача о нагревании шара, изготовленного из однородного материала, принадлежит к классическим задачам математической физики. Решение такой задачи используем для расчета технологических параметров процесса обработки инфракрасными лучами косточек, состоящих из 3-х сферических оболочек (скорлупы, воздушной прослойки и ядра).

Уравнение теплопроводности представляет собой уравнение теплового баланса. Если имеется какое-либо тело объемом V , ограниченное поверхностью S , то согласно закону Фурье количество теплоты dQ , проходящее за время dt через поверхность dS , равно:

$$dQ = \lambda \cdot d\tau \cdot dS \left| \frac{\partial T}{\partial n} \right| = \lambda \cdot d\tau \cdot dS |\text{grad}_n T|, \quad (1)$$

где: λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; n – направление нормали к элементу поверхности dS .

Количество теплоты, проходящее через поверхность S , определяется по формуле:

$$q = -d\tau \iint_{(S)} \lambda \cdot \text{grad}_n T \cdot dS. \quad (2)$$

Это количество теплоты можно подсчитать и другим способом. На увеличение температуры тела объемом dV необходимо затратить количество теплоты, равное:

$$c \cdot \rho \cdot dT \cdot dV = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot d\tau \cdot dV, \quad (3)$$

где: c – теплоемкость тела (косточки); ρ – средняя плотность тела (косточки); dT – повышение температуры тела.

А количество теплоты, воспринимаемое всем объемом тела, равно:

$$Q = -d\tau \iiint_{(V)} c \cdot \rho \cdot \frac{dT}{d\tau} dV \quad (4)$$

Сравнивая формулы (2) и (4), находим:

$$\iiint_{(V)} c \cdot \rho \cdot \frac{dT}{d\tau} dV = \iint_{(S)} \lambda \cdot grad_n T \cdot dS$$

Используя формулу Остроградского, получаем:

$$\iiint_{(V)} \left[c \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} - div(\lambda \cdot grad_n \cdot T) \right] \cdot dV = 0,$$

А так как $dV \neq 0$ и произволен, то

$$c \cdot \rho \frac{dT}{d\tau} - div(\lambda \cdot grad_n \cdot T) = 0$$

Это уравнение и является уравнением теплопроводности при отсутствии источников теплоты. Считая тело (косточку) однородным, т.е. $\rho = const$, $a = const$ и $\lambda = const$, находим:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} div \cdot grad_n \cdot T$$

Обозначив $\frac{\lambda}{c \cdot \rho} = a$ (коэффициент температуропроводности) и заменив $div grad T = \nabla^2 T$ (∇ - оператор Лапласа), находим:

$$\frac{dT}{d\tau} = \nabla^2 T \quad (5)$$

Для шара радиусом r дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{dT}{d\tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (6)$$

Это уравнение не учитывает неоднородность косточки и массообмен, имеющих место при нагревании, так как проведенные расчеты показали, что полученные результаты при этом не искажаются.

Принимаем, что $T(0,r)=f(r)$ - известная функция, характеризующая начальное распределение температуры по радиусу шара; плотность лучистого потока q_c - величина постоянная, т.е. $q_c = const$.

Тогда, начальное и граничные условия будут представлены в виде:

$$T|_{\tau=0} = T_0 = const; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} |_{r=0} = 0; \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{q_c}{\lambda}; \quad (9)$$

$$\left(\frac{dT(0,\tau)}{\partial r} \right) = 0, \quad (10)$$

где q_c - тепловой поток, воспринимаемый поверхностью продукта.

При этом $T(0,\tau) \neq \infty$, так как шар нагревается за конечный промежуток времени.

Уравнение (6), удовлетворяющее условиям (7)-(10) может быть решено различными методами: разделения переменных, источников, операционным, конечных интегральных преобразований и др. Остановимся на классическом, которое получило наибольшее распространение - методе Фурье разделения переменных.

Уравнение (7) методом Фурье, т.е. в виде:

$$T = Q(\tau) R(r), \quad (11)$$

где: R - радиус изделия (косточки);

r - текущий (определяемый) радиус изделия, выражается следующими уравнениями [5] по распределению температур в шаре:

$$T(r,\tau) = T_0 + \frac{q_c R}{\lambda} \left[3Fo - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) \right] \quad (12)$$

Скорость прогресса шара:

$$\bar{T}(r,\tau) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2q_c R}{\lambda \mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n r}{n \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (13)$$

где: μ_n - корни характеристического уравнения $\mu = tg(\mu)$ ($\mu = kR$); T_0 - начальная температура; R - радиус шара; r - текущий радиус - вектор; q_c - количество лучистой энергии, проникшей в продукт (косточку); Fo - критерий Фурье ($Fo = a \cdot \tau / R_{онп}^2$).

Следует отметить, что ряд определений выражения (12) является быстросходящимся и для определения температуры по

формуле (12) можно ограничиться лишь первыми членами.

Удельный расход теплоты ΔQ_V для шара можно определить по формуле:

$$\Delta Q_V = c \cdot \rho [T_{(\tau)} - T_0] \quad (14)$$

Расчет продолжительности сушки косточек инфракрасным излучением осуществляем следующим образом.

Сначала определим:

$$\Theta_{cp} = \frac{t_{cpk} - t_0}{t_c - t_0}, \quad (15)$$

где: Θ_{cp} - безразмерная температура; t_c - температура среды в ИК-камере; t_{cpk} - средняя температура косточки в конце процесса сушки;

$$t_{cpk} = \frac{t_n + t_u}{2},$$

где t_n и t_u - соответственно, температура на поверхности и в центре косточки в конце процесса сушки.

Критерий Био B_i :

$$B_i = \frac{\alpha_{общ}}{\lambda} R_{онп}, \quad (16)$$

где: $R_{онп}$ - определяющий размер изделия; $\alpha_{общ}$ - общий коэффициент теплообмена, $\alpha_{общ} = \alpha_l + \alpha_k$, где α_l и α_k - коэффициенты теплообмена соответственно лучеиспусканием и конвекцией.

Коэффициентом теплоотдачи конвекций α_k можно пренебречь, так как в начале процесса $t_c > t_n$, в конце процесса $t_n > t_c$. Тогда:

$$\alpha_{общ} = \frac{q_c}{t_n - t_c}, \quad \text{где } q_c - \text{лучистый поток, поглощаемый поверхностью}$$

косточки.

Вычислив критерий Био B_i по соответствующим таблицам или графикам [6], определяется критерий Фурье ($Fo = a \cdot \tau / R_{онп}^2$), а из него продолжительность процесса $\tau = Fo R^2 / \alpha$, где R - радиус шара (косточки).

Для проверки адекватности приведенной аналитической модели были определены физические свойства и значения коэффициентов температуропроводности для центральной части и поверхности плодовых косточек черешни, а также коэффициенты

теплопроводности и теплоемкости согласно [7]. Плотность косточек определялась экспериментально [3].

Результаты подсчета прогрева косточек по формуле (12) хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Выбранная модель вполне оправдывает себя при рекогносцировочных расчетах, которые позволяют выбрать излучатели с соответствующими энергетическими характеристиками. Эта модель позволяет оценить процесс тепло-массопереноса при сушке косточек ИК-лучами, так как согласованность между теоретическими и экспериментальными данными вполне удовлетворительная.

Выводы. Изложенное теоретическое обоснование процесса нагрева тела в виде шара позволяет произвести расчеты кинетики процесса сушки косточек ИК-лучами, температуры в центре и удельных расходов теплоты, в том числе при инфракрасном излучении.

Список литературы

1. Черевко, О.І. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. – Харків: Харк. держ. акад. та орг. харчування, 2002 – 420 с.

2. Филоненко, Г.К. Сушка пищевых растительных материалов / Г.К. Филоненко [и др.]; под. общ. ред. Г.К. Филоненко // Пищ. пром.-ть. - Москва, 1971. – 440 с.

3. Поперечний, А.М. Сушіння харчової сировини у псевдозрідженому шарі: монографія / А.М. Поперечний, Н.М. Варваріна, І.В. Жданов. - Донецьк: ДонНУЕТ, 2012.- 303 с.

4. Поперечний, А.М. Кінетика процесу сушіння плодкових кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні/ А.М. Поперечний, Н.О. Миронова // Науковий журнал Харківського державного університету харчування та торгівлі / Міністерство освіти і науки України. – Харків, 2007. – Вип. 7- С.93-100

5. Беляев, Н. М. Основы теплопередачи / Н. М. Беляев. – Киев.: Высшая школа, 1989. – 342 с.

6. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева.- М.: Энергоиздат, 1977. – 366 с.

7. Кошевой, Е.П. Технологическое оборудование предприятий производства растительных масел / Е.П. Кошевой. - СПб.: ГИОРД, 2001.- 368 с.

Анотація

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ІК-НАГРІВУ ПЛОДОВИХ КІСОЧОК

У статті наведені теоретичні основи ІЧ-нагріву, представлені аналітичні залежності, які описують процес нагріву променистою енергією тіла у вигляді кулі.

Annotation

THEORETICAL BACKGROUND INFRARED HEATING FRUIT STONES

The paper presents the theoretical foundations of infrared heating. Analytical dependences that describe the process of heating the radiant energy of the body in the form of a ball