

тинок, ростуть затрати на подрібнення і ускладнюється розділення рідкої і твердої фаз після завершення екстрагування. Тому надмірно висока дисперсність матеріалу може привести до зменшення швидкості процесу і погіршенню його техніко-економічних показників.

#### Висновки

- Методи інтенсифікації процесу екстрагування цільових компонентів із насіння амаранту полягають у попередньому подрібненні та термічній обробці насіння.
- Експериментально доказана ефективність екстрагування олії з насіння амаранту в умовах електромагнітного поля.

#### Література.

1. Development of essential oil extraction by microwave assisted process from a local plant./ Rudy Nurdin, Kaida Khalid, Zainal Abidin Talib and Aspollah Md.Sukari./ Solid State Science and Technology, Vol. 14, No 1, 2006
2. Бурдо О.Г., Светлічний П.І., Буйвол С.М. Екстрагування олії з насіння амаранту в електромагнітному полі. Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: Вып 7-8. Редактор – академик МВИ Калинин Л.Г. Министерство агрополитики Украины, Южный филиал отделения промышленной радиоэлектроники МАИ; Киев – Одесса, 2009 г., 33-38.
3. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. . Экстрагирование в системе «кофе вода». Одесса, 2007. – 176 с.

УДК 664:66.045:537.8

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ПРОДУКТЕ ПРИ ЕГО ОБРАБОТКЕ ПОЛЕМ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Бурдо О.Г., профессор, Рыбина О.Б., к.т.н.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*В работе приведена методика расчета температур в объеме пищевого продукта в условиях действия электромагнитного поля. Рассмотрены стационарный и нестационарный режимы нагрева. Установлено влияние толщины продукта.*

*The methods of calculation of the temperatures in the volume of food product in case of electromagnetic field is proceed are given in the paper. The stationary and unstationary regimes of heating were examined. The influence of thickness of the product were established.*

**Ключевые слова:** распределение температур, теплоотдача, уравнение теплопроводности.

При пастеризации или стерилизации пищевых продуктов при помощи микроволнового поля (МВ) представляет интерес распределение температуры. Существует модель для определения температурного профиля в продукте при его МВ – нагреве, в основе которой лежит уравнение теплопроводности с внутренними источниками.

Распределение температур зависит от формы, размеров и тепловых характеристик продукта, а также от условий теплообмена на его границе.

В результате решения уравнения теплопроводности в идеале находится зависимость температуры от времени (температурно-временной профиль) для любой точки внутри продукта.

**Поствновка задачи.** В работе исследуется распределение температур в продукте при его МВ – обработке при учете четырех основных факторов:

1. распределение внутренних источников тепла, каковыми является электромагнитное поле в продукте;
2. теплоотдача с поверхности продукта;
3. перераспределение температур внутри продукта в результате теплопроводности;
4. форма и размеры продукта.

Ограничимся случаем, когда продукт имеет форму плоского слоя, в который поле проникает с двух противоположных сторон. Соответственно, распределение поля внутри продукта симметрично относительно его центральной плоскости.

**Математическая модель процесса.** Распределение температур определяется решением уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепла. Это решение зависит от следующих параметров – материальных констант продукта:  $\lambda$  – коэффициента теплопроводности,  $\rho$  – плотности,  $c$  – удельной теплоемкости. А также от  $\alpha$  – коэффициента теплоотдачи,  $h$  – толщины продукта,  $p(z)$  – удельной тепловой мощности тепловых источников,  $z$  – координаты и  $\tau$  – времени.

Величина  $p(z)$  связана с напряженностью электромагнитного поля формулой  $p = 2\pi\nu \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2$ .

В качестве модельной среды исследуется молочная сыворотка с параметрами:

$$\lambda = 0,54 \frac{Вт}{м \cdot К}; \quad \rho = 1027 \frac{кг}{м^3}; \quad c = 4082 \frac{Дж}{кг \cdot К}.$$

Для уменьшения числа параметров удобно рассматривать уравнение теплопроводности в безразмерной форме и, соответственно, перейти от вышеприведенных параметров к следующим безразмерным величинам:

$y = z/h$  – безразмерная координата;

$Fo = \frac{\lambda}{c\rho h^2} \tau$  – число Фурье или безразмерное время;

$Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$  – число Био, характеризующее теплоотдачу с поверхности продукта;

$f(z) = \frac{p(z)}{p_0}$  – безразмерная удельная мощность тепловых источников;

$t = \frac{\lambda}{p_0 \cdot h^2} \cdot T$  – безразмерная температура (здесь и дальше под температурой  $T$  подразумевается

избыточная температура – разность между температурой в данной точке продукта и температурой окружающего воздуха).

Вводится обозначение:  $p_0 = \frac{1}{h} \int_0^h p(z) dz$  – средняя удельная мощность тепловых источников.

Решение уравнения теплопроводности таково:

$$\Omega = \frac{1}{Bi} + \int_0^1 dy \int_0^y f(h \cdot y_1) dy_1 - \int_0^y dy \int_0^y f(y \cdot y_1) dy_1 \quad (1).$$

Рассмотрим подробнее полученный результат и сделаем некоторые выводы из него.

#### Стационарный режим.

Поскольку тепловая мощность, выделяющаяся в продукте, не зависит от времени и температуры продукта, а мощность, теряемая продуктом через его поверхность, прямопропорциональна температуре, то в процессе нагрева должен наступать стационарный режим, когда обе эти мощности становятся равными друг другу и, соответственно, распределение температур перестает меняться во времени [1].

#### Равномерное распределение тепловых источников.

При толщинах продукта, существенно меньших глубины проникновения поля в продукт распределение поля в продукте, а, следовательно, и распределение тепловых источников в нем равномерно. Т.е.

$$p(z) = p_0.$$

В этом случае распределение температур определяется простой формулой

$$t = \frac{1}{Bi} + \frac{1-y^2}{2} \quad -1 \leq y \leq 1$$

Соответственно, максимальная температура устанавливается в центре образца (при  $y = 0$ )

$$t(0) = \frac{1}{Bi} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

По мере удаления от центра она монотонно убывает по квадратичному закону и становится минимальной на поверхности

$$t(\pm 1) = \frac{1}{Bi} \quad (3)$$

Важной характеристикой является относительное изменение температуры, которое равно

$$\frac{\Delta t}{t(1)} = \frac{t(0) - t(1)}{t(1)} = \frac{Bi}{2} \quad (4)$$

При малых значениях  $Bi$  распределение температур в образце можно считать однородным. Переходя от безразмерных параметров к размерным, получаем

$$T_{cm} = T(\pm h) = \frac{p_0 \cdot h}{2\alpha} \text{ – на поверхности; } T(0) = \frac{p_0 \cdot h}{2} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{h}{4\alpha} \right) \text{ – в центре; } \frac{\Delta T}{T(h)} = \frac{\alpha \cdot h}{4\lambda} \text{ – относительный перегрев.}$$

Соответственно, для молочной сыворотки

$$T_{cm} = 0,1 p_0 h; \quad T(0) = \frac{p_0 \cdot h}{4} (0,2 + h); \quad \frac{\Delta T}{T(h)} = 5h.$$

Для молочной сыворотки приведенные формулы и значения температур справедливы при  $h \leq 6 \cdot 10^{-3}$  м. При этих толщинах  $\frac{\Delta T}{T} \leq 0,03$  и, следовательно, распределение температур можно считать равномерным [2]

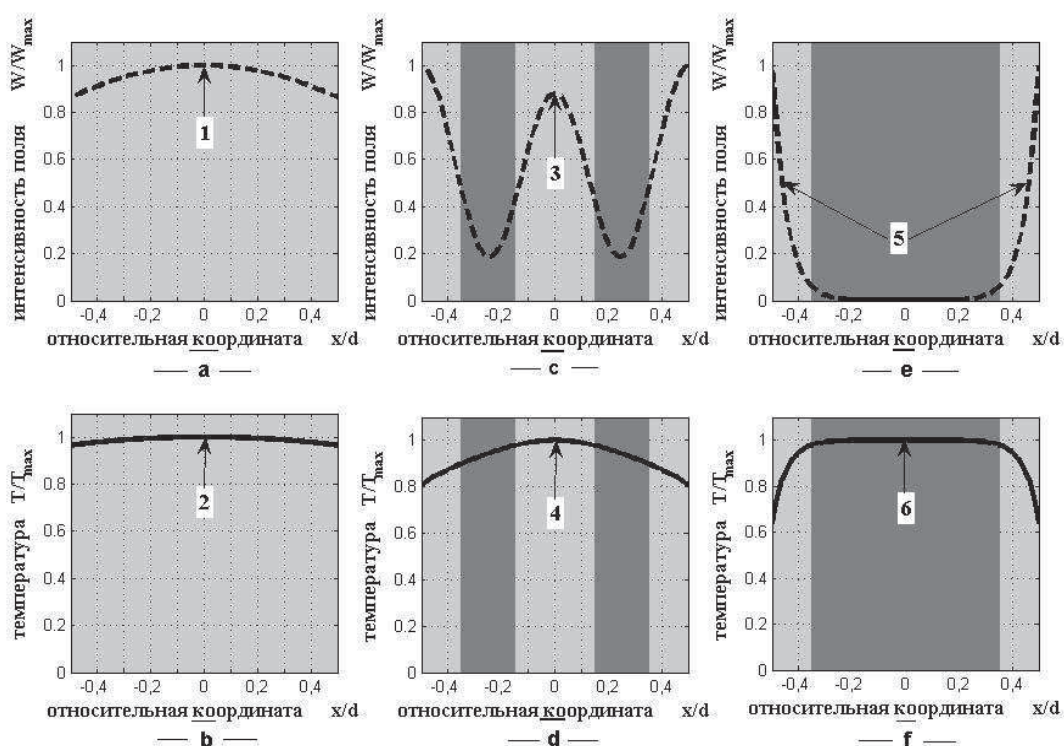


Рис. 1 – Интенсивность электромагнитного поля и температурные поля для разных толщин продукта: а) 0,2 см; б) 0,2 см; с) 1,4 см; д) 1,4 см; е) 10 см; ф) 10 см.

Для иллюстрации на рис. 1а) представлено распределение электромагнитного потенциала и б) распределение температур в слое сыворотки толщиной  $h = 2$  мм.

#### Неравномерное распределение тепловых источников.

При толщинах, больших глубины проникновения или кратных длине полуволны, распределение поля внутри продукта неравномерное.

Так же, как и в случае равномерного действия поля, в рассматриваемом случае максимальное значение температура принимает в центре продукта и по мере приближения к его поверхности она монотонно убывает. На поверхности температура определяется формулой (3), полученной ранее для равномерного поля.

Перегрев между центром и поверхностью определяется новой формулой

$$\Delta t = t(0) - t(1) = \int_0^1 \int_0^y f(hy_1) dy_1 dy \quad (5)$$

Эта величина для заданной функции  $f(z)$  может быть рассчитана.

Для молочной сыворотки соответствующие расчеты были проведены для двух толщин:  $h = 1,4$  см, что соответствует возникновению в продукте стоячей волны, и  $h = 10$  см – толщины, при которой поле проникает только в тонкий поверхностный слой.

Распределения температур в продукте, полученные в результате таких расчетов, представлены на рис. 1 б), d) и 1 f). На этом же рисунке для сравнения приводятся и распределения электромагнитного поля внутри продукта (рис. 1 а), с) и e)).

Из приведенных данных следует, что если распределение тепловых источников внутри продукта неоднородно, то под действием процессов теплопроводности температуры в разных точках выравниваются и становятся приблизительно одинаковыми, за исключением, быть может, поверхностных точек. В результате некоторые части продукта (на рис. 1 с), d), e) и f) они выделены темным цветом) подвергаются только тепловому воздействию, так как поле в этих областях ослаблено, а другие части – комбинированному воздействию электромагнитного поля и теплоты.

**Нестационарный режим.** Специфической особенностью микроволнового нагрева является его быстрое действие. Скорость нагрева может достигать ста градусов в секунду и выше. Преимуществом микроволнового нагрева является также его малая инерционность. Включение и выключение может быть произведено практически мгновенно. При малых временах нагрева распределение температур в образце повторяет распределение тепловых источников в нем, так как процессы теплопроводности инерционны и не успевают существенно влиять на распределение температур. По этой причине для выравнивания температур иногда применяют выдержку после окончания нагрева. Во всех таких случаях процесс оказывается нестационарным.

**Малые толщины.** Рассмотрим изменение температуры продукта со временем для малых толщин, при которых температура во всех точках образца примерно одинакова. В этом случае роль процессов теплопроводности сводится к минимуму и с точки зрения математики задача упрощается. Уравнение теплопроводности можно заменить более простым дифференциальным уравнением.

Зависимость температуры продукта от времени может быть представлена в виде формулы

$$T = T_{cm} \left( 1 - e^{-\frac{2\alpha}{c\rho h} \tau} \right) \quad (6)$$

где  $T_{cm} = \frac{p_0 h}{2\alpha}$  – стационарная температура.

Полагая, что процесс становится приблизительно стационарным, когда  $T = 0,8T_{cm}$ , можно оценить время стационарного режима  $\tau_{cm}$ . Из (6) получаем

$$\tau_{cm} = -\ln 0,2 \cdot \frac{c\rho h}{2\alpha}$$

Для молочной сыворотки, при толщине ее  $h = 10^{-3}$  м это время равно

$$\tau_{cm} = 6 \text{ мин.}$$

В большинстве случаев время нагрева в электромагнитном поле значительно меньше, чем  $\tau_{cm}$  и, соответственно, режим нагрева оказывается нестационарным.

При малых временах формула (6) может быть заменена приближенной

$$T = \frac{p_0}{c\rho} \tau \quad (7)$$

При точности 10% термин «малые времена» означает

$$\tau < 0,1 \frac{c\rho h}{2\alpha}$$

Для молочной сыворотки последнее неравенство принимает вид  $\tau < 20$  с.

В некоторых работах указывается, что в отличие от обычного нагрева при микроволновом нагреве скорость нагрева остается постоянной. Из (7) следует, что эта скорость равна

$$\frac{T}{\tau} = \frac{p_0}{c\rho}$$

#### **Влияние зависимости фактора потерь от температуры.**

При микроволновом нагреве могут наблюдаться некоторые эффекты, характерные только для этого вида нагрева. Рассмотрим один такой эффект.

Пусть фактор потерь  $\epsilon''$  зависит от температуры так, что с ростом температуры он резко возрастает. Будем считать, что размеры продукта выбраны таким образом, чтобы распределение поля внутри него было равномерным. Тогда вначале и распределение температур в продукте будет равномерным. В процессе нагрева  $\alpha''$  растет, следовательно, глубина проникновения уменьшается и поле в середине продукта становится меньше, чем в приповерхностных слоях. Температура в приповерхностных областях возрастает,  $\alpha''$  тоже растет и глубина проникновения поля еще больше уменьшается. Затем все сказанное повторяется. В результате, если вначале продукт грелся равномерно, то при высоких температурах прогреваться будет только тонкий приповерхностный слой.

При нагреве молочной сыворотки этот эффект не имеет места, поскольку зависимость фактора потерь молочной сыворотки от температуры незначительна.

#### **Выводы**

Установленные в работе закономерности распределения температур и электромагнитного поля могут быть использованы при конструировании аппаратов для термообработки пищевых продуктов в импульсном электромагнитном поле.

#### **Литература**

1. Бурдо О.Г. Инженерная методика расчета микроволнового нанопастеризатора / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // 36. наук. праць ОНАХТ, Вип.33, С. 78–82, Одеса 2008
2. Бурдо О.Г. Математическое моделирование процессов низкотемпературной пастеризации / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // 36. наук. праць ОНАХТ, Вип.30, Том 1, Одеса 2007, С. 54–57.

УДК 664.085.4-03

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ АПАРАТІВ ДЛЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ**

**Бурдо О.Г., професор; Яровий І.І., аспірант;  
Малашевич С.А., науковий співробітник; Ружицька Н.В., інженер  
Одеська національна академія харчових технологій**

*Наведено результати експериментальних досліджень з розробки вузла завантаження мікрохвильового апарату та рекомендації щодо його конструювання.*

*The results of experimental research of subassembly of microwave apparatus and recommendations concerning its construction has been discussed.*

**Ключові слова:** мікрохвильовий апарат, замежовий хвильовод, рівень випромінювання

**Вступ.** Перспективи створення потужної техніки для обробки харчової сировини в мікрохвильовому полі пов'язані із вирішенням ряду складних задач специфічної конструкції таких апаратів. По суті, апарати з мікрохвильовим підводом енергії є оригінальними електродинамічними системами, в яких мають здійснюватись зв'язані процеси гідродинаміки, тепло- та масообміну. Досить складні процеси комбінованої взаємодії механічних, термічних та дифузійних явищ в мікрохвильових апаратах (МХА) потребують додаткового урахування електромагнітних полів. Такі задачі не досліджувались, та, прак-