

этим помимо проведения так званых «Стресс тестов» атомных станций необходимо проводить исследования касающиеся возможного выделения неконденсированных газов в ГО АЭС индивидуально для каждого проекта. Этот вывод выплывает из того что в данной ситуации, АЭС Фукусима-1 выдержала землетрясение, цунами и еще 2 суток реакторная установка самостоятельно обеспечивала свою стабильность по сред-

ствам обратных связей, ключевым в развитии аварии стало именно детонация водорода в гермообъеме.

Даная статья была написана на основе общедоступных источников информации, так как Японское правительство продолжает вести политику не разглашения и до сих пор нет никаких официальных отчетов касающихся событий на АЭС Фукусима. То есть данная информация может еще со временем уточняться.

#### Литература

1. А.В.Носовски, В.И.Богорад, В.Н.Васильченко, А.А.Ключников, Т.В.Литвинская, А.Ю.Слепченко. Радиационная безопасность и защита на атомных Электрических станциях. Харьков «Оберіг»,2008. — 354с.

**Розглянуто питання визначення відносної нерівномірності температурного поля усередині функціональної місткості дослідної НВЧ-сушарки**

**Ключові слова:** НВЧ-нагрівання, функціональна місткість, температурне поле

**Рассмотрен вопрос определения относительной неравномерности температурного поля внутри функциональной емкости опытной СВЧ-сушилки**

**Ключевые слова:** СВЧ-нагрев, функциональная емкость, температурное поле

**The problem of relative unevenness determination of the temperature field into the functional capacity of investigated microwave - drier is considered**

**Keywords:** microwave - heating, functional capacity, temperature field

УДК 664.834.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ СВЧ-СУШИЛКИ

**В. А. Потапов**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра холодильной и торговой техники\*  
Контактный тел.: (057) 349-45-88, 066-139-22-27  
E-mail: potapov@bigmir.net

**М. М. Цуркан**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра энергетике и физики\*  
Контактный тел.: (057) 349-45-86, 095-696-47-77  
E-mail: tsurkan\_n@ukr.net

**И. А. Андрюшин**

Магистр  
Кафедра холодильной и торговой техники  
\*Харьковский государственный университет питания и торговли  
ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051  
Контактный тел.: (057) 349-45-86, 093-197-85-03  
E-mail: htt\_hduht@mail.ru

#### Постановка проблемы в общем виде

Одними из наиболее энергозатратных технологических процессов пищевой промышленности независимо от способа их реализации являются процессы сушки разнообразного пищевого сырья, поэтому поиск путей повышения энергоэффективности процессов сушки наряду с другими технологическими процессами в пищевой промышленности является приоритетной проблемой для отраслевой науки.

Сегодня в пищевой промышленности, в частности, в технологических процессах, связанных с сушкой пищевого сырья, все больше распространяется использование СВЧ-энергии. В этом направлении, следовательно, необходимы соответствующие теоретические исследования процессов сушки на примере определенных физических и математических моделей, которые дадут возможность описывать реальные тепломассообменные процессы на основе соответствующих функциональных зависимостей и, таким образом

получать сушеные продукты высокого качества и с минимальными затратами энергии.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Работа является продолжением теоретических исследований процессов СВЧ-сушки пищевого сырья в функциональных емкостях (ФЕ) [1].

**Цели и задачи статьи**

Целью работы является оценка неравномерности температурного поля внутри функциональной емкости с обезвоживаемым сырьем и определение путей ее снижения.

**Изложение основного материала исследований**

Для повышения качества сушеных продуктов при СВЧ-сушке пищевого сырья в функциональных емкостях необходимо обеспечение равномерного нагрева материала в объеме ФЕ.

В работе [1] в качестве критерия равномерности нагрева материала в поле стоячей волны было предложено использовать оптимальную высоту функциональной емкости, обеспечивающую равенство удельной мощности поля на поверхности и в центре ФЕ. При этом предполагалось, что влияние дифракции электромагнитных волн внутри ФЕ с обезвоживаемым материалом незначительно по сравнению с процессом поглощения СВЧ-энергии.

Согласно [1], плотность внутренних источников теплоты в ФЕ определяется выражением:

$$w(z) = w_0(\text{ch}2k''z + \cos 2k'z) \tag{1}$$

где

$$w_0 = \frac{1}{4}\omega\epsilon_0\epsilon''E^2; \quad k' = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'}}{\lambda}; \quad k'' = \frac{\pi\sqrt{\epsilon'}\text{tg}\delta}{\lambda}; \tag{2}$$

$\omega$  – циклическая частота СВЧ-колебаний,  $c^{-1}\lambda$  – рабочая длина волны, м;  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$  – тангенс угла диэ-

лектрических потерь;  $\epsilon', \epsilon''$  – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости.

Будем считать, что в начальный период сушки при разогреве материала изменением его диэлектрических и теплофизических свойств можно пренебречь. Исходя из этого, определим температурное поле внутри ФЕ из уравнения теплопроводности с соответствующими краевыми условиями [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{C\rho}, \quad (-d_0 \leq z \leq d_0) \tag{3}$$

$$T(z,0) = T_0, \quad \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T(d_0,\tau)}{\partial z} + H[T(d_0,\tau) - T_0] = 0 \tag{4}$$

где  $C$  – удельная теплоемкость обезвоживаемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала в объеме ФЕ, кг/м<sup>3</sup>;  $a = \lambda_t / C\rho$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_t$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $T$  и  $T_0$  – соответственно, температура внутри ФЕ и температура сушильного агента, К;  $H = \alpha / \lambda_t$ ,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности

ФЕ, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d_0$  – полувысота ФЕ, м.

Применяя к уравнениям (3) и (4) преобразование Лапласа, получим:

$$\frac{\partial^2 T_L}{\partial z^2} - \frac{s}{a} \left( T_L - \frac{T_0}{s} \right) = -\frac{w}{aC\rho s}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial T_L(0,s)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T_L(d_0,s)}{\partial z} + H \left[ T_L(d_0,s) - \frac{T_0}{s} \right] = 0 \tag{6}$$

где  $T_L$  – температура в пространстве изображений Лапласа,  $s$  – аргумент преобразования Лапласа.

Чтобы оценить максимальную неравномерность температурного поля, возможную при нагреве материала в функциональной емкости оптимальной высоты, найдем частное решение уравнения (5) с источником теплоты вида  $w = w_0 \cos 2k'z$ , поскольку именно этот

член описывает влияние дифракции электромагнитных волн на распределение температурного поля в объеме ФЕ:

$$T_L = \frac{T_0}{s} + \frac{w_0}{C\rho} \left( \frac{1}{s^2} + \frac{\cos 2k'z}{s(s+4k'^2a)} - \frac{1}{\text{ch}\sqrt{\frac{s}{a}}d_0 + \frac{1}{H}\sqrt{\frac{s}{a}}\text{sh}\sqrt{\frac{s}{a}}d_0} \right) \times \left( \frac{1}{s^2} - \frac{2k'}{H} \frac{\sin 2k'd_0 - \cos 2k'd_0}{s(s+4k'^2a)} \right) \cdot \text{ch}\sqrt{\frac{s}{a}}z \tag{7}$$

При нестационарном процессе и малых тепловых потерях, что имеет место в случае СВЧ-нагрева материала в ФЕ, в пространстве изображений выполняется

неравенство  $\sqrt{\frac{s}{a}}d_0 \approx \frac{1}{H}\sqrt{\frac{s}{a}} \gg 1$ . Поэтому, учитывая

асимптотические представления гиперболических функций в выражении (7), его можно упростить:

$$T_L \approx \frac{T_0}{s} + \frac{w_0}{C\rho} \left( \frac{1}{s^2} + \frac{\cos 2k'z}{s(s+4k'^2a)} \right) \tag{8}$$

Применяя обратное преобразование Лапласа к выражению (8) получим:

$$T \approx T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \left( \tau + \frac{1}{4k'^2a} (1 - e^{-4k'^2a\tau}) \cos 2k'z \right). \tag{9}$$

Очевидно, с увеличением времени нагрева неравномерность температурного поля, которая определяется слагаемым пропорциональным  $\cos 2k'z$ , уменьшается.

Для максимального повышения равномерности нагрева материала в объеме ФЕ необходимо потребовать, чтобы выполнялось условие  $\exp(-4k'^2a\tau) \ll 1$ . Отсюда

получаем:  $4k'^2a\tau > 2$  или  $\tau > (2k'^2a)^{-1}$ . Таким образом, существует предельно минимальное время нагрева материала в СВЧ-поле

$$\tau_{\min} = \frac{1}{2k'^2a} \quad (10)$$

Для характерных параметров процесса СВЧ-нагрева пищевых материалов [3] расчетная величина  $\tau_{\min} \approx 40$  с.

Оценим максимальную относительную температурную неравномерность по высоте функциональной емкости  $\Delta\theta$  при условии  $\tau > \tau_{\min}$  по формуле

$$\Delta\theta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (11)$$

Очевидно, при  $\tau > \tau_{\min}$  выполняется условие

$\exp(-4k'^2a\tau) \ll 1$ , поэтому

$$T_{\max} \approx T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \left( \tau + \frac{1}{4k'^2a} \right), \quad T_{\min} \approx T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \left( \tau - \frac{1}{4k'^2a} \right) \quad (12)$$

Подставляя выражения (12) в формулу (11), получим:

$$\Delta\theta \approx \frac{w_0}{4k'^2\lambda_t \left( T_0 + \frac{w_0}{C\rho} \tau \right)} \quad (13)$$

Следовательно, температурная неравномерность, обусловленная дифракцией электромагнитных волн в объеме ФЕ, уменьшается с увеличением времени нагрева материала, его диэлектрических характеристик и коэффициента теплопроводности. Задаваясь температурной неравномерностью  $\Delta\theta$  при нагреве материала, из (13) можно определить соответствующее время нагрева:

$$\tau = \frac{C\rho}{w_0} \left( \frac{w_0}{4\Delta\theta k'^2\lambda_t} - T_0 \right) \quad (14)$$

---

### Выводы

---

Таким образом, полученные зависимости позволяют определить относительную неравномерность температурного поля внутри функциональной емкости с обезвоживаемым материалом, а также оптимальное время нагрева, при котором ее значение будет минимальным.

---

### Литература

1. Потапов В. А. Определение оптимальной высоты функциональной емкости СВЧ-сушилки. [Текст] В.А. Потапов, Н. М. Цуркан // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2012. - №1. С.148-152
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. [Текст] / А.В. Лыков, – М.: Высшая школа, 1967, – 600 с.
3. Рогов И. А. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов. [Текст] / И. А. Рогов, С.В. Некрутман, – М.: Пищ. пром-сть, 1976, - 210 с.