

В. А. ПОТАПОВ, докт.техн.наук, проф., зав.каф., ХГУПТ, Харьков
М. М. ЦУРКАН, канд,техн.наук,доц., ХГУПТ, Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ СВЧ-СУШИЛКИ

Розглянуто питання визначення оптимальних геометричних розмірів функціональної місткості для розміщення зневоднюваної сировини в НВЧ-сушарці.

Ключові слова: НВЧ-нагрів, функціональна місткість

Рассмотрен вопрос определения оптимальных геометрических размеров функциональной емкости для размещения обезвоживаемого сырья в СВЧ-сушилке.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, функциональная емкость

The question of determination of optimum geometrical sizes of functional capacity is considered for placing of the dehydrated raw material in MV-dryer.

Keywords: MV-warming, functional capacity

Постановка проблемы в общем виде

Сегодня в пищевой промышленности, в частности, в технологических процессах, связанных с тепловой обработкой и сушением пищевого сырья, все больше распространяется использование СВЧ-энергии. Это диктуется в первую очередь требованиями повышения энергоэффективности тепломассообменных процессов как наиболее энергозатратных, к тому же, этому способствует и современное развитие оборудования и устройств для генерации СВЧ-энергии.

Максимальная энергоэффективность таких процессов в первую очередь будет зависеть от эффективного использования мощности СВЧ-генератора, что связано как с его рациональной нагрузкой, так и с геометрическими формами рабочей камеры СВЧ-сушилки и геометрическими формами функциональной емкости с обезвоживаемым сырьем.

Анализ последних исследований и публикаций

Работа является продолжением теоретических и экспериментальных исследований процессов сушки в функциональных емкостях (ФЕ) с использованием СВЧ-энергоподвода [1]. Одним из условий равномерности СВЧ-нагрева обезвоживаемого сырья является выбор оптимальных геометрических размеров функциональной емкости.

Цели и задачи статьи

Целью работы является теоретическое обоснование геометрии функциональной емкости опытной СВЧ-сушилки, которые обеспечивают условия равномерного нагрева пищевого сырья в процессе его сушки.

Изложение основного материала исследований

Определяющим геометрическим размером функциональной емкости с сырьем является ее высота d , которая на порядок (как минимум) меньше ее ширины. Таким образом, в первом приближении, ФЕ можно представить в виде пластины толщиной d , размещенной в центре резонаторной СВЧ-камеры.

В качестве критерия равномерности и эффективности СВЧ-нагрева принято считать глубину проникновения электромагнитного поля в диэлектрическую среду [2]

$$\Delta = \frac{\lambda}{\pi\sqrt{\varepsilon'}\operatorname{tg}\delta}, \quad (1)$$

где λ - рабочая длина волны, м; $\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ - тангенс угла диэлектрических потерь; $\varepsilon', \varepsilon''$ - действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости.

Принято считать также, что толщина d материала обрабатываемого в СВЧ-поле не должна превышать Δ . Однако, понятие глубины проникновения имеет смысл для бесконечно толстого слоя диэлектрика. Распространяющаяся в нем электромагнитная волна затухает от поверхности к центру. Функциональная емкость с сырьем представляет собой диэлектрик конечной толщины ($d \sim \Delta$), помещенный в поле стоячей волны. В этом случае, с одной стороны, амплитуда внутреннего поля убывает от поверхности к центру, с другой – концентрируется в пучностях стоячей волны, возникающей внутри материала. Поэтому глубину равномерного нагрева в этом случае можно определить как максимальную высоту ФЭ, обеспечивающую равенство удельной мощности потерь в центре и на поверхности материала.

В соответствии с принятой моделью рассмотрим СВЧ-нагрев диэлектрика, имеющего форму бесконечной пластины толщиной $2d$ (рис. 1). При этом, как и в случае введения понятия глубины проникновения, будем считать обезвоживаемое сырье в функциональной емкости однородным диэлектриком, который облучается плоской электромагнитной волной. Поскольку нагрев происходит в практически закрытой ФЭ, потерями теплоты в окружающую среду пренебрегаем ввиду незначительных градиентов температур и малой длительности нагрева.

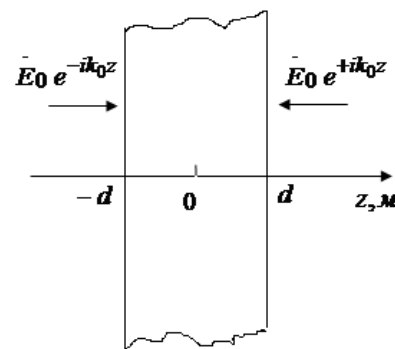


Рис. 1. Функциональная емкость с материалом в поле стоячей волны

Электромагнитное поле внутри ФЭ описывается системой дифференциальных уравнений Максвелла, решение которой для бесконечной пластины имеет вид [2]:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{A} e^{-ikz} + \frac{1}{2} \dot{B} e^{ikz} \quad (2)$$

$$\dot{H} = \frac{1}{2W} \left(\dot{A} e^{-ikz} - \dot{B} e^{ikz} \right) \quad (3)$$

где \dot{E} , \dot{H} - соответственно, комплексные напряженности электрического, В/м и магнитного полей, А/м; z - текущая координата, м; \dot{A} , \dot{B} - комплексные постоянные, определяемые из граничных условий при $z = -d$ и $z = d$, В/м; W - волновое сопротивление среды, Ом; $k = k' - ik''$ - комплексная постоянная распространения, м⁻¹, где

$$k' = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'}}{\lambda}; \quad k'' = \frac{\pi\sqrt{\epsilon'}\operatorname{tg}\delta}{\lambda} \quad (4)$$

Вследствие симметрии рассматриваемой задачи граничные условия на обеих поверхностях ФЕ будут одинаковыми, следовательно, $\dot{A} = \dot{B}$ и для электрической компоненты поля внутри функциональной емкости запишем следующее выражение

$$\dot{E} = \dot{A} \cos kz \quad (5)$$

Согласно [2], удельная мощность, выделяемая внутри ФЕ с материалом, определяется следующим образом:

$$Q_V = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\dot{E}|^2 \quad (6)$$

где Q_V - удельная мощность потерь, Вт/м³; ω - циклическая частота, с⁻¹; ϵ_0 - электрическая постоянная, Ф/м.

Определив квадрат модуля косинуса (5) от комплексного аргумента [3], получим

$$Q_V(z) = \frac{1}{4} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\dot{A}|^2 (ch2k''z + \cos 2k'z). \quad (7)$$

Изменение Q_V по d показано на рис. 2. При малых временах τ , характерных для СВЧ-нагрева, температурное поле внутри ФЕ с материалом будет преимущественно определяться законом изменения Q_V [4]. Поэтому критерием равномерного нагрева материала в функциональной емкости как пластины конечной толщины может служить условие

$$Q_V(0) = Q_V(d) \quad (8)$$

При этом неравномерности температуры t , вызванные дифракционной картиной распределения Q_V , будут с течением времени уменьшаться в результате действия эффектов теплопроводности.

Определим максимальную полувысоту ФЕ d_0 , при которой выполняется равенство (8). Учитывая (7), условие (8) перепишем следующим образом:

$$ch2k''d_0 = 2 - \cos 2k'd_0. \quad (9)$$

Решение трансцендентного уравнения (9), определяющее искомую величину d_0 , существует при $ch2k''d_0 \leq 3$. Поэтому в нулевом приближении разложим в ряд

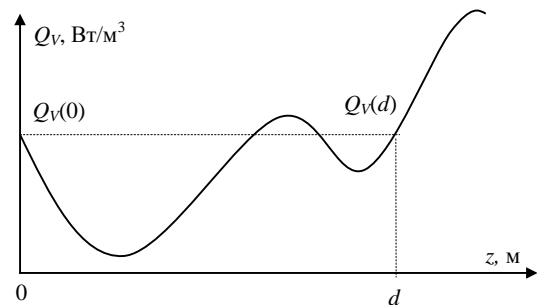


Рис. 2. Изменение удельной мощности по высоте ФЕ

по малому параметру функцию $ch2k''d_0$, а $\cos 2k'd_0$ заменим его средним (нулевым) значением

$$\frac{(2k''d_0)^4}{24} + \frac{(2k''d_0)^2}{12} - 1 = 0 \quad (10)$$

Большой из положительных корней биквадратного уравнения (10) является искомым нулевым приближением d_{00} . После несложных вычислений получаем

$$d_{00} \cong \frac{0,7\lambda}{\pi\sqrt{\varepsilon'}tg\delta}. \quad (11)$$

Следующее приближение для величины d_0 определим, разлагая в ряд Тейлора функции, входящие в уравнение (9) в окрестности точки нулевого приближения d_{00} . Ограничиваясь квадратичными членами разложения, после преобразований получим следующее уравнение относительно d_0 :

$$\begin{aligned} & (2k''^2 ch2k''d_{00} - 2k'^2 \cos 2k'd_{00})(d_0 - d_{00})^2 + (2k'' sh2k''d_{00} - 2k' \sin 2k'd_{00}) \\ & \times (d_0 - d_{00}) + ch2k''d_{00} - 2 + \cos 2k'd_{00} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая то, что d_{00} – корень уравнения $ch2k''d_{00} = 2$, а также формулы (4), (11), перепишем уравнение (12):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\pi\sqrt{\varepsilon'}}{\lambda}\right)^2 \left(tg^2\delta - 2\cos\frac{2,8}{tg\delta}\right)(d_0 - d_{00})^2 + \\ & + \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'}}{\lambda} \left[(sh1,4)tg\delta - 2\sin\frac{2,8}{tg\delta} \right] (d_0 - d_{00}) + \cos\frac{2,8}{tg\delta} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Решение уравнения (13) дает искомую величину для полувисоты функциональной емкости d_0 , обеспечивающий равномерный нагрев материала в СВЧ-поле:

$$\begin{aligned} d_0 = \frac{\lambda}{\pi\sqrt{\varepsilon'}tg\delta} \left[0,7 + tg\delta \left(\frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4m \cos(2,8/tg\delta)}}{4m} \right) \right]; \quad (14) \\ m = \frac{tg^2\delta - 2\cos\frac{2,8}{tg\delta}}{1,9tg\delta - 2\sin\frac{2,8}{tg\delta}}. \end{aligned}$$

Для определения максимального значения d_0 по формуле (14) следует выбрать больший из корней уравнения.

Выводы

Таким образом, получена расчетная зависимость для определения максимальной высоты функциональной емкости для обезвоживаемого сырья, при которой обеспечивается его равномерный нагрев в резонаторной камере СВЧ-сушилки.

Список литературы: 1. *Погожих Н.И.* Метод определения напряженности СВЧ-поля по темпу нагрева модельного тела. [Текст] / Н. И. Погожих, В.А. Потапов, Н. М. Цуркан, О.Ю Гриценко // Науково-методологічні аспекти енергоефективності моделювання енерготехнологій: Зб. наук праць/ Голов. ред.. Б.В. Егоров. – Одеса: ОНАХТ, 2011. – Вип..39, том 2. - с. 16-18. 2. *Рогов И.*

А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. [Текст] / И. А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981, - 200 с.3. Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. [Текст] / Т. Корн, Г. Корн – М.: Наука, 1973, - 832 с.4. Нетушил А.В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. [Текст] / А.В. Нетушил и др. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1956, - 480 с.

Поступила в редколлегию 15.01.2012

УДК 629.735Ю083.02.06(045)

Ю.М. ТЕРЕЩЕНКО, докт.техн.наук, проф., НАУ, Київ,
І.О. ЛАСТІВКА, канд.техн.наук, зав.каф.,НАУ, Київ

ВПЛИВ ПАСИВНОГО УПРАВЛІННЯ ОБТІКАННЯМ У ДВОРЯДНИХ КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТКАХ НА ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ ЇХ РОБОТИ

Проведено дослідження течії в дворядних компресорних решітках та зроблено аналіз впливу пасивного управління обтіканням на основні показники їх роботи.

Ключові слова: дворядна компресорна решітка, управління обтіканням.

Проведены исследования течения в двухрядных компрессорных решетках и сделан анализ влияния пассивного управления обтеканием на основные показатели их работы.

Ключевые слова: двухрядная компрессорная решетка, управление обтеканием.

Studies of flow in two-row compressor lattices are presented in the work. Analysis of the effects of passive control flow around the main indicators of the compressor lattice was made.

Key words: two-row compressor lattices, control flow.

1. Вступ

Підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів та забезпечення їх газодинамічної стійкості в широкому діапазоні експлуатаційних режимів тісно пов'язане з дослідженням потоку повітря в решітках аеродинамічних профілів компресорів та вирішенням задачі щодо локалізації або попередження зривного обтікання лопаткових вінців і зниження рівня втрат в проточній частині компресора, обумовлених нерозрахунковим обтіканням лопаток та аеродинамічними кромковими слідами за елементами статора. Аеродинамічні сліди є причиною різних видів нерівномірності потоку і його пульсацій на вході в компресор, що призводить до небезпечних з точки зору міцності резонансних коливань лопаток робочого колеса [1,2,3]. Запобігти зриву потоку і зменшити інтенсивність аеродинамічних слідів за вихідними кромками лопаток статора можна за допомогою енергетичних методів впливу на течію в примежових шарах [2,4,5,6,7,8].

За принципом дії на течію в примежових шарах на поверхнях аеродинамічних профілів компресорів управління обтіканням ділиться на активне і пасивне. Активне управління обтіканням і вплив на аеродинамічні сліди реалізується шляхом видування через щілини профілів у напрямі основного потоку по дотичній до обтічної поверхні додаткової маси повітря (газу) в пристінний примежовий шар. При пасивному управлінні обтіканням вплив на примежовий шар здійснюється за допомогою перерозподілу енергії в потоці без