

УДК 537.811 (075.8)

ПОЛУОТКРЫТЫЙ ОБЪЕМНЫЙ СВЧ РЕЗОНАТОР

Каганов В.И., д.т.н., профессор, Email: Kaganovwil@yandex.ru
МГТУ МИРЭА, г.Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено устройство и энергетические показатели СВЧ объемного резонатора полуоткрытого типа. Для двух типов полуоткрытого резонатора рассчитана структура электромагнитного поля. Приведены результаты лабораторного эксперимента по СВЧ нагреву воды. Предложены возможные области применения полуоткрытых резонаторов.

Ключевые слова: объемный резонатор, электромагнитные волны, энергия, нагрев.

HALF-OPEN VOLUME MICROWAVE OVEN RESONATOR

Kaganov William I., D.ofSci(Tech), prof., Email: Kaganovwil@yandex.ru
MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The device and power indicators of the microwave oven of the microwave oven of the volume resonator is considered. For two types of half-open resonator the structure of electric field is counted. Results of laboratory experiment on the microwave oven to heating of water are given. Possible scopes of half-open resonators are given

Keywords: oven resonator, electromagnetic waves, energy, heating.

Введение.

Известно два основных типов объемных резонаторов: закрытого и открытого типов [1 – 3]. Первые – прямоугольного и цилиндрического вида - применяются в СВЧ диапазоне, вторые, с зеркалами-отражателями различной формы, в том числе параболической, – в миллиметровом и оптическом диапазонах волн (рис.1). Во всех объемных резонаторах за счет многократного отражения от внутренних стенок возбуждаются и поддерживаются стоячие электромагнитные волны.

Одно из применений объемных резонаторов относится к СВЧ облучению расположенных внутри них различных предметов, дистанционно нагреваемых за счет преобразования электромагнитной энергии в тепло [4].

Для этой цели обычно используются закрытые резонаторы, поскольку в них концентрация электромагнитной энергии значительно превосходит открытые, в которых значительная часть энергии в СВЧ диапазоне «выплескивается» за пределы пространства между отражателями.

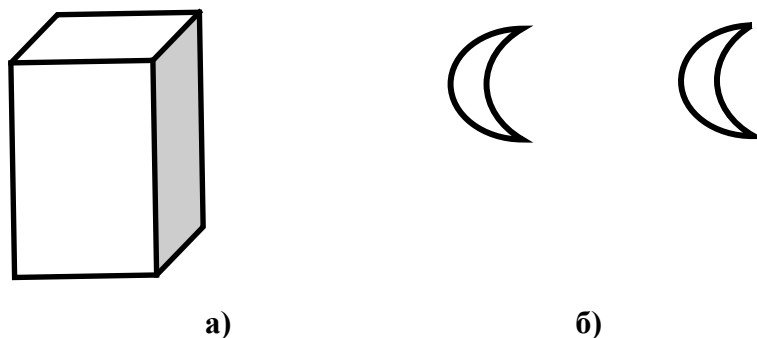


Рис.1 Резонаторы закрытого и открытого типа

Вместе с тем во многих случаях тело, вводимое во внутреннюю полость резонатора, необходимо не только быстро и эффективно нагреть, но и моментально вывести наружу. В другом случае, например, при нагреве длинных проводов, их невозможно разместить в закрытом пространстве.

В этой связи возникает следующая проблема: как совместить положительное свойство СВЧ закрытого объемного резонатора по эффективному нагреву тела с возможностью его быстрого перемещения, что обеспечивается в менее эффективном в отношении нагрева открытом резонаторе.

Объемный резонатор полуоткрытого типа.

Представляется возможным два данных качества совместить в объемном резонаторе нового типа, который назовем полуоткрытым. Два варианта устройства такого полуоткрытого резонатора приведены на рис.2.

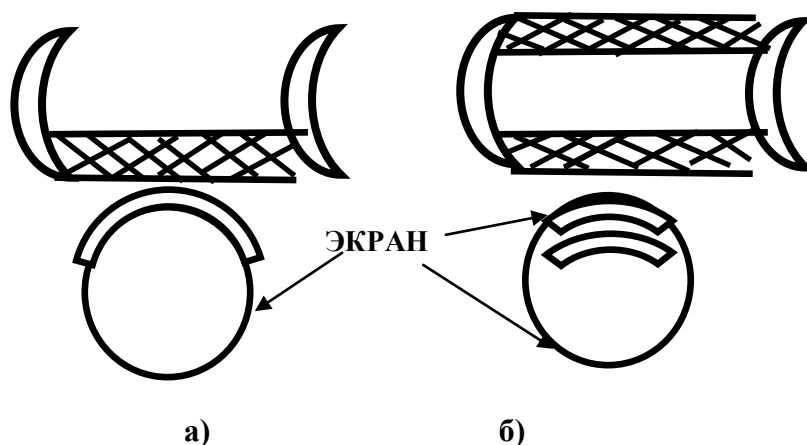


Рис.2 Два варианта устройства полуоткрытого резонатора

В них отражатели параболической формы соединяются между собой металлической сеткой: в первом случае по одной части окружности, во втором – по двум. Такая конструкция должна, с одной стороны, частично предотвратить «выплеск» во вне элек-

ромагнитной энергии, а с другой - обеспечить возможность быстрого ввода и вывода нагреваемого тела из полости резонатора.

Исследуем более подробно свойства полукрытого резонатора, рассмотрев следующие вопросы:

- энергетическую сторону процессов, протекающих в резонаторе ;
- температуру нагрев предмета, вводимого в пространство между отражателями ;
- связь резонансной частоты с размерами резонатора ;
- вид структуры электромагнитного поля.

О преобразовании электромагнитной энергии в тепло.

В основе анализа преобразования электромагнитной энергии в тепло лежит уравнение Пойтинга, определяющее изменение во времени энергии электромагнитного поля W в объеме V [3, 5]:

$$(1) \quad \frac{dW}{dt} = P_{\Gamma} - \int_V \gamma E^2 dV - \int_S [E \mathbf{H}] dS ,$$

где P_{Γ} – мощность сторонних источников энергии (генераторов), отдающих свою энергию в объем V ; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля; S – поверхность, ограничивающая объем V ; γ – удельная проводимость тел, находящаяся внутри объема.

Второе слагаемое в правой части уравнения (1) есть мощность электромагнитной энергии, переходящей в тепло по причине активных потерь в объеме V ; третье – определяется вектором Пойтинга $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$, характеризующим энергию, излучаемую за пределы рассматриваемого объема V через поверхность S . В резонаторе закрытого типа третье слагаемое равно нулю, в полукрытом его следует принимать во внимание.

Нагрев тела, введенного в полость резонатора, определяется его химическим составом. Для тел, насыщенных влагой (например, дерева) или металлических предметов, покрытых льдом, этот нагрев во многом определяется свойство воды преобразовывать энергию электромагнитного поля в тепло. Остановимся более подробно на последнем вопросе.

Нагрев воды с помощью электромагнитного поля

Кратко рассмотрим, почему под воздействием СВЧ электромагнитного поля возможен дистанционный, быстрый нагрев воды [6]. Ассиметричное строение молекулы воды приводит к поляризации ее электрических зарядов, что позволяет рассматривать

молекулу воды в качестве электрического диполя, обуславливающего дипольный момент (рис.3) :

$$(2) \quad p = q l \quad [_{\text{Д= Кл}\cdot\text{м}}],$$

где q – заряд, l – длина диполя, $\text{Д} = 3,335 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$ – единица дипольного момента, называемая дебай.

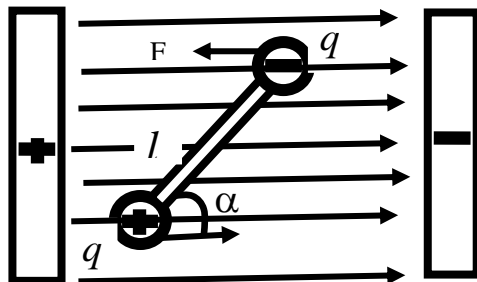


Рис.3

Дипольный момент одной молекулы воды :

$$p = 1,87 \text{ Д} = 6,24 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}.$$

При отсутствии внешнего электрического поля молекулы воды располагаются хаотично, а при его наличии строго выстраиваются в одном направлении .

Под действием высокочастотного электрического поля молекулы воды в силу изменяющегося направления вектора электрической напряженности начинают поворачиваться то в одну, то в другую сторону, совершая за одну секунду $K=2f$ поворотов, где f - частота колебаний поля.

Работа, совершаемая одной молекулой воды при таком вращении (рис.3) за одну секунду составит :

$$W_1 = \int_0^\pi q l K E \sin \alpha d\alpha = \pi q l f E \approx 2 \times 10^{-20} f E \quad [\text{Дж}], \quad (3)$$

где f - частота колебаний, МГц; E - напряженность электрического поля, кВ.

Согласно молекулярно-кинетической теории такое быстрое, интенсивное движение молекул приводит к повышению температуры тела. В этом и заключается объяснение дистанционного нагрева воды с помощью высокочастотного электромагнитного поля, приводящее к быстрому, одновременному вращению множества молекул. В описываемом процессе такое влияние оказывается наиболее интенсивным при определенных

резонансных частотах, свойственных каждому веществу. Для воды такая одна из резонансных частот $f=2450$ МГц. (Именно на эту частоту настроены магнетроны в бытовых микроволновых печах). При данной частоте и напряженности поля $E=10$ кВ согласно (3) энергия одной поляризованной молекулы под действием СВЧ электромагнитного поля составит $5 \cdot 10^{-16}$ Дж. Громадное количество таких вращающихся молекул и приводит к быстрому, дистанционному нагреву воды.

Общая энергия, затрачиваемая на нагрев размещенного внутри резонатора тела:

$$W_{\pi} = c m \Delta T = P_{\pi} \Delta t, \quad (4)$$

где c – теплоемкость материала с учетом описанного дипольного момента, P_{π} – мощность, расходуемая на нагрев объекта на ΔT градусов, Δt – время нагрева.

Измерив ΔT , можно определить, какая часть мощности генератора $P_{Г}$ расходуется на нагрев объекта P_{π} . Отношение, этих двух мощностей $K_{М} = P_{\pi} / P_{Г}$, назовем коэффициентом микроволнового нагрева.

Энергия электромагнитное поля в объемном резонаторе

Отметим, что сущность колебательного процесса в объемном резонаторе, как и в обычном колебательном контуре с сосредоточенными постоянными, состоит в непрерывном, периодическом прямом и обратном преобразовании энергии электрического поля в энергию магнитного поля. Каждое из этих полей характеризуется вектором напряженности из трех составляющих, соответственно по трем координатам: \mathbf{E} – для электрического поля, \mathbf{H} – магнитного. Все составляющие каждого из векторов, как электрического, так и магнитного полей, колеблется синфазно, а относительно друг друга повернуты на $\pi/2$. Сказанное позволяет записать для энергий электрического и магнитного полей:

$$W_{э} = \int_V 0,5 \varepsilon |E|^2 dV, \quad (5)$$

где ε – диэлектрическая постоянная, V – объем резонатора,

$$W_{м} = \int_V 0,5 \mu |H|^2 dV, \quad (6)$$

где μ – магнитная постоянная.

Сумма данных выражений есть общая энергия электромагнитного поля в резонаторе W_0 , которая при резонансном режиме:

$$W_0 = W_{э}(t) + W_{м}(t) = \text{const}. \quad (7)$$

При этом колебания самих энергий (электрической и магнитной) происходят с удвоенным значением резонансной частоты f_p :

$$W_{\text{Э}}(t) = 0,5 W_0 [1 - \cos(4 \pi f_P t)] , \quad (8)$$

$$W_{\text{М}}(t) = 0,5 W_0 [1 + \cos(4 \pi f_P t)] \quad (9)$$

Графики нормированных функций (8) и (9) приведены на рис.4.

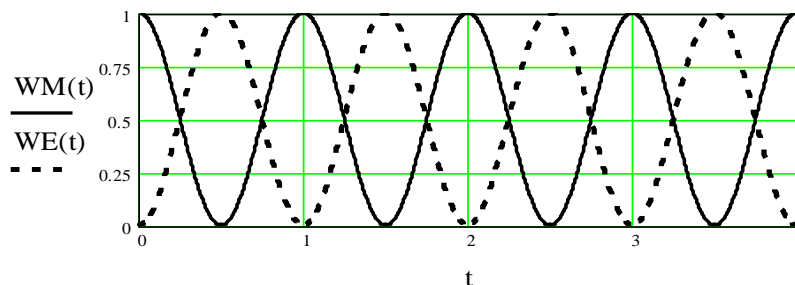


Рис.4

Энергия, введенная в объемный резонатор от подключенного к нему генератора, расходуется на тепловую энергию, разогревающую стенки металлического резонатора, и нагрев размещаемого внутри него объекта, и является источником формирования электромагнитного поля .

Для мгновенных мощностей электрических и магнитных колебаний из (7) и (8) соответственно получим:

$$P_{\text{Э}}(t) = \frac{dW_{\text{Э}}(t)}{dt} = 2 \pi f_P W_0 \sin(4 \pi f_P t) , \quad (10)$$

$$P_{\text{М}}(t) = \frac{dW_{\text{М}}(t)}{dt} = -2 \pi f_P W_0 \sin(4 \pi f_P t) \quad (11)$$

Амплитуды этих колебаний в Q раз больше мощности генератора, что позволяет установить связь между энергией электромагнитных колебаний при резонансе с мощностью внешнего генератора P_{Γ} :

$$W_0 = P_{\Gamma} Q / 2 \pi f_P . \quad (12)$$

где Q - добротность резонатора с учетом активных потерь в металлических стенках резонатора и в нагреваемом объекте, введенного в полость резонатора.

Резонансная частота

При резонансе вдоль каждой из стенок любого типа объемного резонатора должно укладываться целое число полуволин колебаний. В цилиндрическом резонаторе закры-

того типа (рис.5) при поперечно-электрической волне типа H_{11p} резонансная частота согласно [3] :

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{(0,343/R^2) + (p/L)^2}} , \quad (13)$$

где R - радиус цилиндра, L - его длина, p - целое число, равное количеству полу-волн, укладываемых в режиме стоячей волны вдоль длины резонатора.

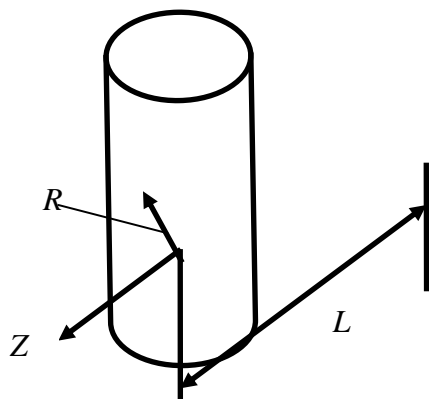


Рис.5

При поперечно-магнитной волне типа E_{01p} та же резонансная частота;

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{(0,586/R^2) + (p/L)^2}} . \quad (14)$$

С определенной поправкой формулы (13) и (14) можно распространить на объемные открытые и полуоткрытые резонаторы со сферическими отражателями параболического типа (рис.1,б и рис.2).

Структура электромагнитного поля полуоткрытого резонатора.

Амплитуда монохроматических колебаний электромагнитного поля определяется с помощью уравнения Гельмгольца, которое при цилиндрической системе координат для напряженности электрического поля имеет вид [7]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + k^2 E + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 0 , \quad (15)$$

где $k=2\pi/\lambda$ - фазовая постоянная, λ - длина волны, r - длина радиус-вектора, ϕ - полярный угол, z - координата по оси цилиндра (рис.5).

Решение уравнения (15) можно искать методом разделения переменных [7], представив его в виде двух уравнений первое из которых есть уравнение Бесселя :

$$E_1(\phi, r) = 0, \quad E_2(z) = 0. \quad (16)$$

Решим данное уравнение численным путем. Полученное решение при $r=2R$ аппроксимируем с помощью функции, содержащей гиперболический секанс, представив ее для полуоткрытого резонатора первого типа в виде (рис.2,а) :

$$E(\phi, z) = \frac{2 K_1}{\exp[(x - \pi)\alpha] + \exp[(-x + \pi)\alpha]} + E_0(R, z), \quad (17)$$

и для второго типа (рис.2,б):

$$E(\phi, z) = \frac{2 K_2}{\exp[(x - 0,5\pi)\alpha] + \exp[(-x + 0,5\pi)\alpha]} + \frac{2 K_2}{\exp[(x - 1,5\pi)\alpha] + \exp[(-x + 1,5\pi)\alpha]} + E_0(R, z), \quad (18)$$

где $K_1, K_2, \alpha, E_0(R, z)$ - некоторые постоянные, зависящие от величины радиуса цилиндра и величины энергии, вводимой в резонатор со стороны генератора..

Пример графиков функций (17) и (18) при $K_1=0,5$; $K_2=0,5$; $\alpha=48$ $E_0(R, z) = 0,4$ построены соответственно на рис.6,а и 6,б.. С их помощью наглядно видно, как часть электрического поля резонатора располагается и за его пределами.

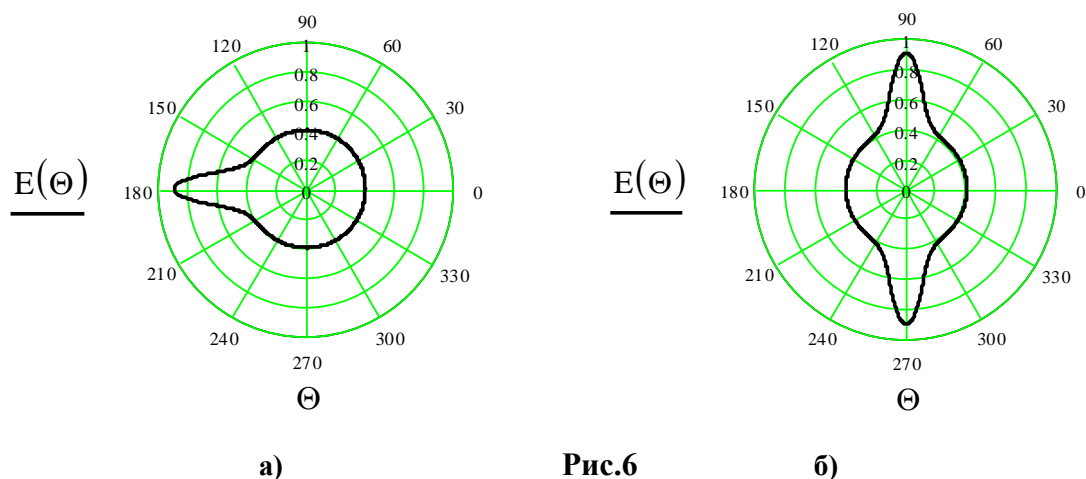


Рис.6

Экспериментальная проверка предлагаемого метода нагрева объектов

Приведем результаты экспериментальной проверки предлагаемого метода быстрого нагрева воды в резонаторе полуоткрытого типа, проведенного автором настоя-

щей статьи. в одной из лабораторий института РТС государственного технического университета МИРЭА. Фотография лабораторной установки приведена на рис.7.

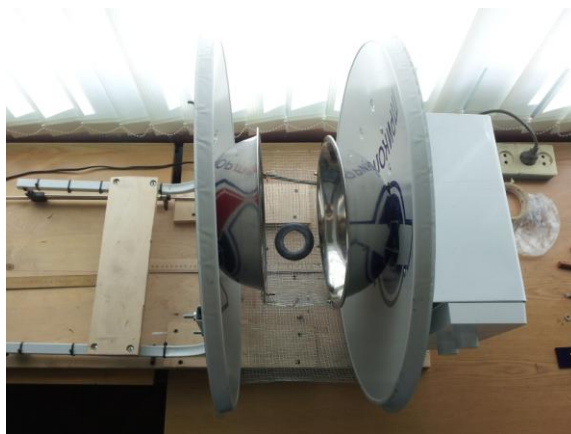


Рис.7

Установка включает магнетрон мощностью 800 Вт с блоком питания от серийно выпускаемой микроволновой печи. В качестве резонатора полуоткрытого типа использовались два металлических рефлектора диаметром 25см, соединенные между собой снизу в одном случае одной металлической сеткой согласно рис.2,а, а во втором – двумя согласно рис.2,б.

В качестве индикатора эффективности нагрева с помощью микроволнового излучения использовался баллон с водой массой 100г, помещенный в свободное пространство между отражателями (рис.7). При мощности магнетрона 800 Вт частотой 2450 МГц вода нагревается на $\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$ за 3 минуты в 1-м случае, и за 2 минуты □ во 2-м случае.

Для нагрева того же количества воды в микроволновой печи с резонатором закрытого типа требуется 1,5 минуты. Следовательно, коэффициент эффективности микроволнового нагрева в созданной лабораторной установке с полуоткрытым резонатором 1-го типа в два раза меньше, чем в аналогичной установке с резонатором закрытого типа, и в полтора – с полуоткрытым резонатором 2-го типа.

Таким образом, экспериментально подтвержден принцип нагрева воды с помощью микроволнового генератора (магнетрона) частотой 2450 МГц и полуоткрытого резонатора.

Возможные области применения полуоткрытого резонатора для быстрого нагрева.

Первая область связана с ликвидацией наледи на контактном проводе железной дороги и высокоскоростного трамвая. Дело в том, что гололед оказывает самое неблагоприятное воздействие на функционирование железнодорожного и скоростного трам-

вайного транспорта по причине обледенения проводов контактной сети. Образование ледяной пленки разной толщины на проводах происходит при определенных метеорологических условиях (температуре и влажности воздуха, направлении и скорости ветра). Особенно значительные отложения наледи на проводах могут накапливаться при относительно длительном перерыве между прохождением поездов по железной дороге. Следствием наледи является увеличение массы контактных проводов, что ведет к их обрыву и ухудшению условий токосъема. В результате возникают дуговые разряды с повышенными токами, что приводит к повреждению дорогостоящих графитовых токоприемников пантографов и обжигу проводов. Подобные явления возникают даже при образовании на проводах тонкого ледяного слоя в виде инея. Расположив на крыше электровоза или скоростного трамвая дополнительный пантограф с укрепленным на нем резонаторами полуоткрытого типа, можно будет быстро расплавлять наледь на контактном проводе и обеспечивать надежный контакт с ним графитового токоприемника.

Вторая возможность область применения полуоткрытого объемного резонатора связана с воздействием СВЧ излучения на деревья и некоторые сельскохозяйственные продукты для борьбы с вредными насекомыми.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что с помощью микроволнового нагревателя с полуоткрытым резонатором можно реализовать идею по эффективному дистанционному нагреву различных предметов и возможности быстрого ввода и вывода последних из зоны облучения.

Список литературы

1. Вайштейн Л.А., Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М., Сов. радио, 1966.
2. Нефёдов Е.И. Открытые коаксиальные резонаторы. – М., Наука, 1982.
3. Джексон Дж. Классическая электродинамика – М., Мир, 1965.
4. Диденко А.Н., Зверев Б.И. СВЧ-энергетика – М., Наука, 2000.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М., ГИТТЛ, 1956.
6. Дерголец В.Ф. Мир воды. – Л., Недра, 1979
7. Владимиров В.С., Жариков В.В. Уравнения математической физики. – М., Физматлит, 2008.