

УДК 621.396.029.6

## ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ,  
канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ, О.А. РЫМАРЕВА  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены результаты моделирования поля излучения резонансной и нерезонансной щелевых антенн в ближней зоне. Проведен предварительный аналитический расчет облучателей и оптимизация их геометрии с применением метода конечных разностей решения электродинамической задачи в трехмерной геометрической области. На основании результатов моделирования получены графики амплитудного и векторного распределения напряженности СВЧ-поля на различном расстоянии от облучателей, а также рассчитаны коэффициенты отражения и передачи в диапазоне возможной девиации частоты питающего генератора. Проведены экспериментальные исследования поля излучения нерезонансной антенны в закрытой экранированной камере при помощи индикатора. Выявлены и проанализированы достоинства и недостатки рассматриваемых типов антенн для применения их в качестве облучателей в установках СВЧ-нагрева материалов.*

**Введение.** Процессы нагрева и сушки материалов в электромагнитном поле СВЧ-диапазона имеют свои достоинства и недостатки [1]. Основной проблемой при реализации процессов нагрева и сушки материалов в СВЧ-поле является неоднородно распределяемое поле в технологической зоне нагрева и объекте нагрева соответственно. Эта неоднородность главным образом обусловлена возникновением интерференционной картины поля в результате наложения многочисленных вторичных волн, неизбежно образующихся в результате отражения от поверхности объекта нагрева и стенок металлической камеры. Для уменьшения указанного эффекта возможно применение поглощающего покрытия на стенках камеры [2], изменение способа возбуждения камеры или ее геометрии (использование нескольких источников, пирамидальных облучателей, рассеивающих элементов) [3, 4]. Предложенные методы решения проблемы не являются универсальными, имеют свои ограничения и не всегда подходят для использования их в тех или иных технологических СВЧ-установках.

Анализируя состояние проблемы и разработанные на сегодняшний день пути ее решения, наиболее перспективным является способ облучения материалов плоской волной, образуемой щелевыми вводами СВЧ-энергии в камеру.

Для реализации этого способа в технологических СВЧ-установках могут быть использованы резонансные и нерезонансные волноводно-щелевые антенны, так как они позволяют сформировать плоский фронт волны падающего поля и произвести облучение объектов большой протяженности. Резонансные и нерезонансные щелевые антенны имеют свои достоинства и недостатки.

Цель данной работы – оценить эффективность применения резонансной и нерезонансной щелевых антенн для создания на образце однородного распределения поля при высоких передаточных характеристиках с наличием отраженных в направлении антенны волн и незначительной девиации рабочей частоты СВЧ-генератора.

Используемое в работе численное моделирование с применением метода конечных разностей (МКР) решения основного уравнения электродинамики позволяет получить и исследовать картину распределения напряженности излучаемого СВЧ-поля на любом расстоянии от антенны, а также определить и оптимизировать параметры облучателей.

**Расчет и моделирование резонансного облучателя.** В качестве резонансной антенны был выбран излучатель с продольными (шунтовыми) щелями в широкой стенке прямоугольного волновода (рис. 1).

Аналитический расчет щелевых антенн с различными видами и конфигурацией излучающих щелей хорошо разработан и подтвержден на практике [5].

Условие согласования волноводно-щелевого излучателя:

$$nG_{щ} = 1,$$

где  $n$  – количество щелей;  $G_{щ}$  – нормированная проводимость щели:

$$G_{щ} = 2,09 \frac{a \lambda_g}{b \lambda} \cos^2 \left( \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g} \right) \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right).$$

Здесь  $a, b$  – поперечные размеры волновода, м;  $\lambda, \lambda_g$  – длины волн в свободном пространстве и в волноводе соответственно, м;  $x$  – расстояние от середины волновода до середины щели, м.

Окончательно, геометрические параметры излучателя на основе волновода стандартного сечения  $90 \times 45$  мм и рабочей частоте  $f = 2,45$  ГГц ( $\lambda = 12,24$  см,  $\lambda_g = 16,685$  см): количество щелей 10;  $x = 9,5$  мм; ширина ( $t_{щ}$ ) и длина ( $l_{щ}$ ) щели:  $t_{щ} \ll l_{щ} = 4$  мм и  $l_{щ} = \lambda/2 = 6,12$  см, расстояние между щелями ( $d$ ) составляет  $d = \lambda_g/2 = 8,34$  см.

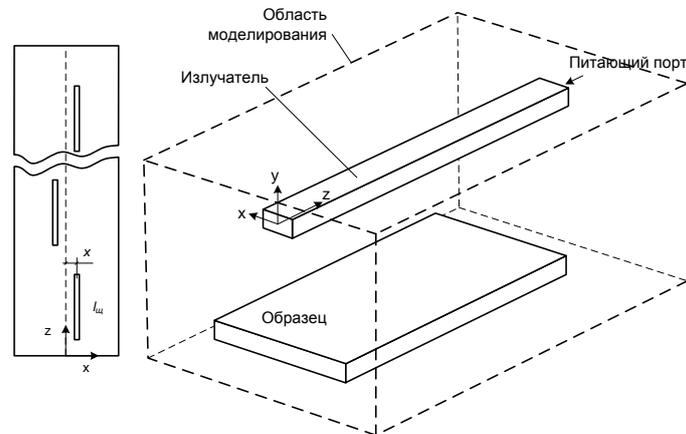


Рис. 1. Волноводно-щелевой излучатель и геометрия области моделирования

На основании полученных аналитических данных о размерах облучателя разрабатывалась ее трехмерная компьютерная модель для численного решения электродинамической задачи. Граничные условия на внешней поверхности области рассматриваемой геометрии задавались как неотражающие. Возбуждение самой антенны осуществлялось через питающий порт гармонической волной основного типа  $H_{10}$  на частоте 2,45 ГГц, причем в процессе моделирования частоту можно было изменять в пределах 2,2...2,8 ГГц.

Область моделирования разбивалась на ячейки с шагом не более  $1/10$  длины волны, чем достигались сходимость и требуемая точность решения. Таким образом, количество элементарных ячеек сетки разбиения области составило около 1 млн. Предварительное моделирование излучения антенны на частоте 2,45 ГГц в открытом пространстве (без образца) показало слишком высокий расчетный коэффициент отражения  $|S_{11}|$ , который составил 0,45 (20 % по мощности). Путем проведения серии численных расчетов с различными длинами излучающих щелей была определена их оптимальная длина ( $l_{щ} = 5,75$  см), при которой  $|S_{11}|$  оказался минимальным ( $|S_{11}| = 0,054$ ). Результаты моделирования излучения СВЧ-поля резонансной щелевой антенны в свободном пространстве представлены на рисунке 2.

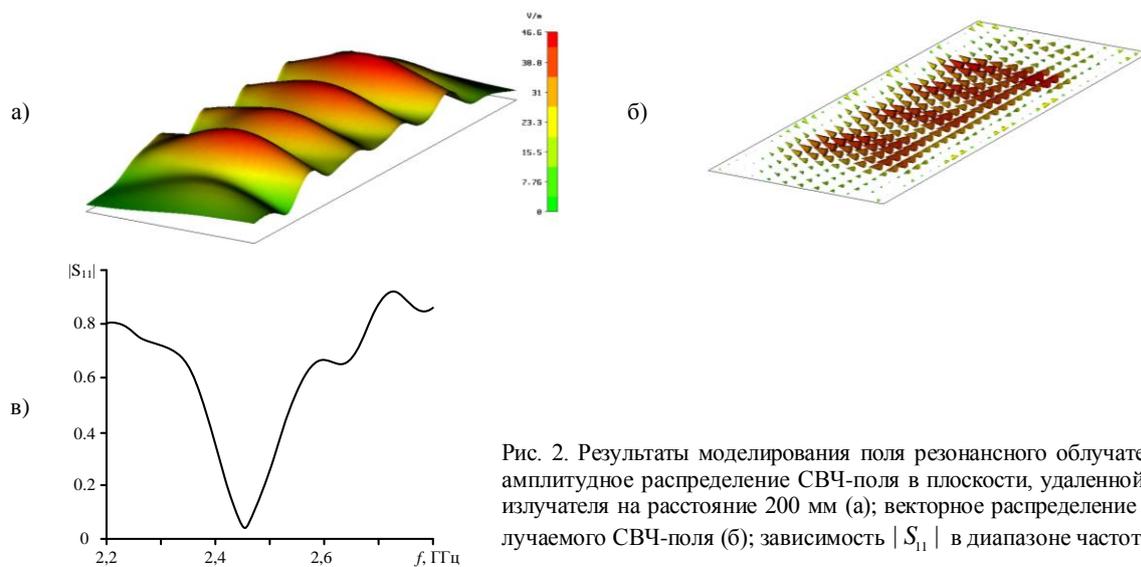


Рис. 2. Результаты моделирования поля резонансного облучателя: амплитудное распределение СВЧ-поля в плоскости, удаленной от излучателя на расстояние 200 мм (а); векторное распределение излучаемого СВЧ-поля (б); зависимость  $|S_{11}|$  в диапазоне частот (в)

Как видно из рисунка 2, а структура поля излучения в ближней зоне облучателей состоит из «всплесков» амплитуды напряженности поля вдоль их длины, образованных излучением щелей. Максимальные значения «всплесков» равны, а их распределение по длине облучателя равномерно.

Результаты моделирования показали, что вектор напряженности излучаемого СВЧ-поля лежит в плоскости излучения и направлен поперечно облучателю (рис. 2, б). В диапазоне частот 2,2...2,8 ГГц антенна проявляет резонансные свойства (рис. 2 в), а отклонение частоты на 5...10 % от резонансной приводит к увеличению коэффициента стоячей волны (КСВН) и резкому снижению ее КПД.

**Расчет и моделирование нерезонансного облучателя.** Геометрические параметры излучающих щелей нерезонансного облучателя и их расположение подбирались в результате серии численных экспериментов по минимальным значениям коэффициентов отражения  $|S_{11}|$  и передачи  $|S_{12}|$ . Расстояние между излучающими щелями нерезонансной антенны было принято  $d = 0,7 \cdot \lambda_0 / 2 = 5,84$  см при количестве щелей 13. Для выравнивания амплитуды излучаемого поля вдоль антенны было определено оптимальное смещение первой щели от центра волновода  $x = 5$  мм, а последующих  $x_i = x_{i-1} + 1$  мм. Другие геометрические параметры облучателя не изменялись.

Результаты моделирование поля нерезонансного облучателя на частоте 2,45 ГГц в ближней зоне излучения (без образца) представлены на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, а, структура поля излучения в ближней зоне облучателей имеет большее количество «всплесков», что вызвано увеличением количества излучающих щелей. Коэффициент отражения  $|S_{11}|$  (рис. 3, б) минимален в рассматриваемом диапазоне частот, что говорит о возможности хорошего согласования антенны с генератором без применения развязывающих или компенсирующих СВЧ-устройств. Коэффициент полезного действия рассматриваемого облучателя составляет не менее 90 % на частоте 2,45 ГГц и снижается до 80 % при отклонении частоты на 5...10 % за счет повышения неиспользуемой мощности СВЧ-поля, поглощаемой на выходном конце облучателя.

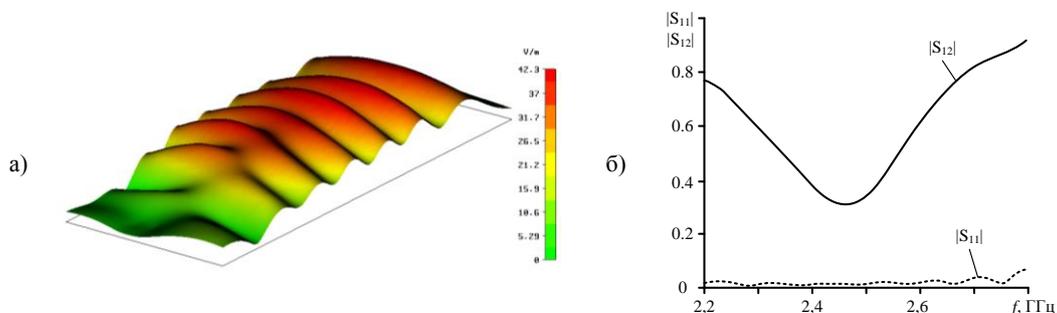


Рис. 3. Результаты моделирования поля нерезонансного облучателя: амплитудное распределение СВЧ-поля в плоскости, удаленной от излучателя на расстоянии 200 мм (а), зависимость  $|S_{11}|$  и  $|S_{12}|$  (б)

**Экспериментальные исследования.** Исследование поля излучения нерезонансного облучателя производилось в закрытой камере (рис. 4, а). Облучатель запитывался от СВЧ-модуля (рис. 4, б), присоединенного к задней стенке камеры и содержащего магнетрон, циркулятор и согласованную волноводную нагрузку. Питание магнетрона осуществлялось при помощи высоковольтного блока питания, работающего по двухполупериодной схеме выпрямления с умножением напряжения.

Фиксирование распределения поля излучения облучателя осуществлялось при помощи индикаторного раствора – хлорида кобальта, нанесенного на лист плотной бумаги. Экспериментально измеренное распределение поля приведено на рисунке 4, в. Области максимальной напряженности излучаемого СВЧ-поля соответствует участкам, окрашенным в синий цвет. Как видно из термограммы (рис. 4, в), нерезонансный облучатель обеспечивает приемлемое продольное распределение СВЧ-поля. Возникновение участков с неравномерным поперечным распределением обусловлено возникновением стоячих волн в результате образования отраженных вторичных волн и интерференции.

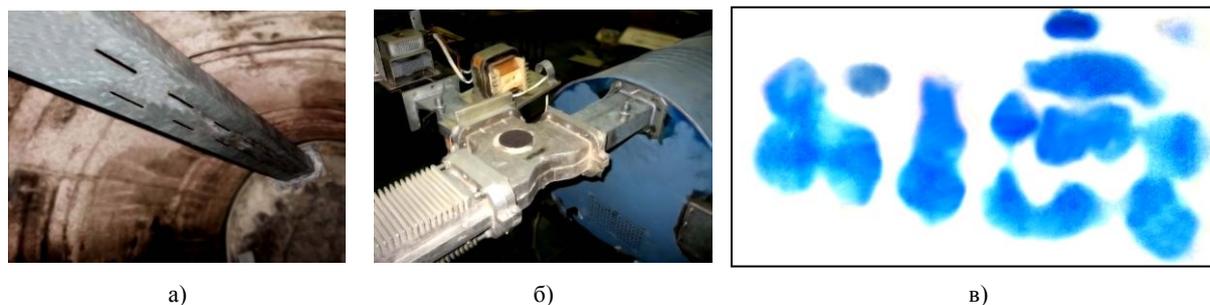


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки (а, б) и снимок термограммы распределения поля на расстоянии 200 мм от плоскости облучателя (в)

**Заключение.** Рассмотренные резонансная и нерезонансная щелевые антенны обеспечивают приемлемую однородность поля в ближней зоне, о чем свидетельствуют численные и экспериментальные данные. Как было показано в [6], несмотря на возникновение отраженного от диэлектрического образца поля, согласование антенн не ухудшается.

Расположение излучающих щелей облучателей может быть изменено и оптимизировано для получения заданного амплитудного распределения поля, что является важным фактором для применения таких антенн в качестве излучателей в технологических установках СВЧ-нагрева объектов большой протяженности.

Достоинством нерезонансных щелевых антенн является достаточная полоса пропускания для обеспечения потребного согласования с генератором без необходимости применения развязывающих СВЧ-устройств, а также отсутствие значительного влияния колебания частоты генератора на распределение поля в ближней зоне излучателя. Единственным недостатком являются дополнительные потери энергии до 10...15 % в поглощающей нагрузке на выходном конце облучателя.

Параллельное расположение нескольких антенн позволяет создавать двухмерные облучатели для СВЧ-нагрева больших объемов материалов.

Применение таких облучателей позволяет создавать плоский фронт падающего поля на объект нагрева. Несмотря на наличие гребенчатой структуры поля по длине облучателя и в объеме материала соответственно следует ожидать, что температурное поле в материале будет выравниваться как за счет теплопроводности и инертности тепловых процессов, так и вследствие молярного и фильтрационного переноса жидкости и пара за счет диффузии и возникающего значительного внутрипорового и капиллярного давления, как это было показано в [7, 8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С. П. Кундас [и др.]. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. – 292 с.
2. Лучевая СВЧ-печь для термообработки материалов: пат. 4179 U BY, МПК 8 F 26B 3/00, H 05B 6/64 / А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг, С.П. Кундас, А.В. Лаптинский, О.В. Можейко. – № 20070525; заявл. 16.07.2007; опубл. 28.02.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальнай уласнасці. – 2008. – № 1. – С. 234.
3. Кураев, А.А. Основы оптимального проектирования технологических установок СВЧ-нагрева / А.А. Кураев, И.Ю. Малевич, Т.Л. Попкова // Радиотехника и электроника: респ. межведомств. сб. науч. тр. – 2000. – Вып. 25. – С. 129 – 135.
4. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии: моногр. / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко и Н.К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 682 с.
5. Кюн, Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн. – Л.: Судостроение, 1967. – 520 с.
6. Компьютерное моделирование работы нерезонансного щелевого излучателя на реальную нагрузку / А.Л. Адамович [и др.] // Проблемы проектирования и производства РЭС: материалы V междунар. науч. техн. конф., Новополоцк, 29 – 30 мая 2008 г. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т. III. – С. 318 – 322.
7. Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых средах при периодическом микроволновом нагреве / А.Л. Адамович [и др.] // Инж.-физич. журнал. – 2007. – № 1, Т. 80. – С. 3 – 12.
8. Изотермический влагоперенос при интенсивном микроволновом нагреве древесины / А.Л. Адамович [и др.] // V Минск. Междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ., Минск, 24 – 28 мая 2004 г.; ИТМО НАНБ. – Минск, 2004 г. – Т. 2. – С. 196 – 197.

Поступила 12.01.2009