

УДК 532.613

ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ КАМЕРЫ СВЧ-НАГРЕВА И СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
Ю.В. МАТЕЛЕНКО, О.А. КИЗИНА, Т.А. БУЛЬБЕНКОВА
(Полоцкий государственный университет)*

На основе компьютерного моделирования проведены расчет и оптимизация параметров излучателей в виде щели в торце волновода с экраном, предназначенным для работы на рабочих частотах бытовых магнетронов 2,45 и 2,465 ГГц в лучевых СВЧ-камерах нагрева и сушки материалов. Проведено компьютерное моделирование распределения СВЧ-поля от излучателя в зависимости от смещения и конечных размеров экрана. Приведены данные для выбора расстояний между соседними излучателями в камерах с многомагнетронным возбуждением для достижения приемлемой равномерности распределения СВЧ-поля в материале. Продемонстрированы результаты измерения КСВН излучателя, выполнена оценка нагрева излучателя поверхностными токами при его работе в камере. Представлены тепловизионные снимки СВЧ-нагрева влажных досок в камере при облучении одним и двумя излучателями.

Введение. Известно применение рупорных, резонансных и нерезонансных волноводно-щелевых антенн для ввода и распределения СВЧ-энергии в лучевых установках СВЧ-нагрева и сушки материалов. Их конструктивный расчет хорошо разработан и приведен в литературе, отражающей вопросы по антенной технике [1 – 4].

Рупорные антенны для СВЧ-камер просты по конструкции, могут объединяться в одно- двухмерные излучающие решетки и имеют приемлемое согласование с генератором в широком диапазоне частот. Недостатками рупорных антенн являются: ограниченная величина углов раскрытия в Е-плоскости; необходимость увеличения длины рупора при увеличении площади апертуры; неполное согласование с генератором, обусловленное отражением поля от краев раскрытия рупора; попадание вторичных волн, отраженных от материала в тракт генератора вследствие большой площади апертуры рупора.

Резонансные волноводно-щелевые излучатели не так подвержены влиянию вторичных волн, образуют плоский фронт волны вдоль излучателя, также позволяют создавать одно- и двухмерные излучающие решетки, имеют коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), равный единице на резонансной частоте. Однако при этом согласуются с генератором в узком диапазоне частот, критичны к частоте питающего генератора и требуют обеспечения высокой точности изготовления волновода, размеров щелей и их размещения, причем с увеличением длины антенны требования к точности повышаются. Нерезонансные волноводно-щелевые излучатели не так требовательны к точности изготовления, имеют приемлемое согласование в широком диапазоне частот, однако имеют 15...20 % потери мощности в оконечной поглощающей нагрузке. Кроме того, при установке волноводно-щелевых антенн в камеру и соединении их с СВЧ-генератором могут потребоваться различные Е- и Н-изгибы.

Наиболее простыми по конструкции и изготовлению являются известные в литературе излучатели в виде одиночной щели, прорезанной в торце прямоугольного волновода. При определенных размерах волновода и щели эти излучатели идеально согласуются с генератором на рабочей частоте и являются узкополосными. Такими излучателями могут быть оснащены СВЧ-камеры с многомагнетронным возбуждением на недорогих бытовых магнетронах.

Целью данной работы является расчет и оптимизация характеристик излучателя, настроенного на работу с бытовыми магнетронами, определение параметров возбуждаемого им СВЧ-поля, определение расстояния между излучателями при создании камеры многоэлементного возбуждения.

Расчет оптимальных параметров щели. Рассмотрим излучатель в виде щели шириной $t_{щ}$ и длиной $l_{щ}$, прорезанной в торце прямоугольного волновода сечением $a \times b$, с бесконечным проводящим экраном (рис. 1), находящийся в свободном пространстве.

Требуется определить ширину $t_{щ}$ и длину $l_{щ}$ щели, чтобы достигался минимальный коэффициент отражения S_{11} на рабочей частоте бытовых магнетронов $f_p = 2,45$ ГГц и $f_p = 2,465$ ГГц (длина волны $\lambda = 0,12236$ м и $0,12162$ м соответственно). В расчете принимался волновод стандартного сечения: $a = 90$ мм, $b = 45$ мм, с толщиной стенки 0,5 мм.

Моделирование осуществлялось в программном пакете CST Microwave Studio, предназначенном для численного решения уравнений электродинамики методом конечных разностей. Расчетная сетка имела от 1 до 4,6 млн. ячеек в зависимости от сложности задачи с максимальным размером ячейки в сетке не более $\lambda/10$. Для моделирования использовался персональный компьютер с процессором Intel Core 2 Duo 2,93 ГГц, объемом оперативной памяти 4 Гб и операционной системой Windows 7. Благодаря симмет-

ричности задачи задавались в плоскостях симметрии граничные условия: в плоскости yz равенство нулю тангенциальной магнитной составляющей поля $H_t = 0$, в плоскости xz равенство нулю тангенциальной составляющей поля $E_t = 0$. Предварительно проводилась серия расчетов для определения минимального размера экрана в E -плоскости излучателя, при котором интенсивность отраженных от его границ дифрагмированных волн была минимальна.

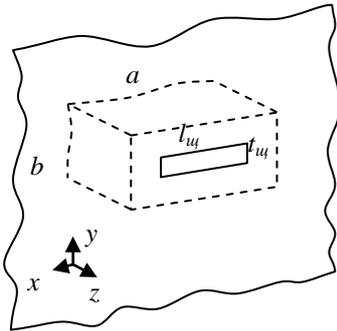


Рис. 1. Излучатель с экраном

Для расчета принимались излучатели со щелями шириной $t_{щ} = 10$ и 5 мм. Длина щелей $l_{щ}$ предварительно задавалась равной $\lambda/2 = 122,36 / 2 \approx 60$ мм, а затем оптимизировалась для достижения минимального коэффициента отражения S_{11} на рабочих частотах $2,45$ и $2,465$ ГГц.

На рисунке 2 для сравнения приведены графики S_{11} в диапазоне частот оптимальных щелей с $t_{щ} = 5$ мм, $l_{щ} = 57,5$ мм и $t_{щ} = 10$ мм, $l_{щ} = 57$ мм, рассчитанных на частоту резонанса $2,45$ ГГц.

Как видно, для более широкой щели обеспечивается несколько большая полоса пропускания в пределах девиации частоты магнетрона ± 50 МГц, обусловленной нестабильным тепловым режимом работы магнетронов и нестабильностью питающего анодного напряжения. Кроме того, более широкая щель имеет больший запас электрической прочности по пробое, что необходимо принимать во внимание, так как излучатели работают в условиях повышенных температур и влажности в СВЧ-сушильных камерах.

В таблице 1 приведены оптимальные параметры излучателя со щелью с $t_{щ} = 10$ мм для двух рабочих частот магнетронов.

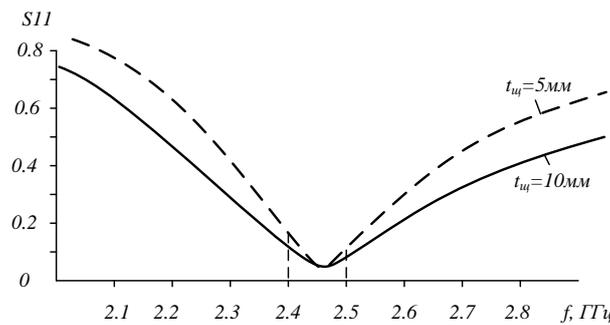


Рис. 2. S_{11} излучателей со щелями шириной 5 и 10 мм

Таблица 1

Расчетные размеры щелей и параметры излучателя на волноводе 90×45 мм

Рабочая частота, ГГц	2,45	2,465
Сечение волновода $a \times b$, мм	90 × 45	
Размеры щели $t_{щ} \times l_{щ}$, мм	10 × 58	10 × 57,5
Значения S_{11} на f_p (в полосе ± 50 МГц от f_p)	0,06 (0,11...0,095)	0,063 (0,1...0,11)

Оценка электрической прочности щели и плотности поверхностных токов. Согласно результатам моделирования расчетная максимальная и минимальная напряженность электрической составляющей возбуждаемого СВЧ-поля в щели $7,1$ кВ/м и $2,5$ кВ/м (рис. 3) при подводимой мощности от генератора P_0 , равной

$$P_0 = \frac{E_0^2 \cdot a \cdot b}{4 \cdot Z_n} = \frac{513^2 \cdot 0,09 \cdot 0,045}{4 \cdot 513} = 0,52 \text{ Вт,}$$

где E_0 – напряженность электрического поля в центре волновода, В/м, равная 513 В/м при напряженности магнитного поля 1 А/м и волновом сопротивлении волновода $Z_n = 376,7 / \sqrt{1 - \lambda / \lambda_{кр}^2} = 513$ Ом с критической длиной волны $\lambda_{кр} = 2 \cdot a = 0,18$ м на частоте $2,45$ ГГц.

При пересчете на $P_0 = 1$ кВт подводимой мощности максимальная и минимальная напряженность поля в щели составит 310 и 110 кВ/м соответственно. Таким образом, при ширине щели 10 мм и пробивном напряжении сухого воздуха при атмосферном давлении 3000 кВ/м [5] обеспечивается запас по электрической прочности почти в 10 раз.



Рис. 3. Распределение напряженности СВЧ-поля в щели (а) поверхностных токов в области щели (б)

Согласно результатам расчетов наибольшая плотность токов наблюдается у коротких сторон щели (см. рис. 3). На этих участках целесообразно нанесение покрытия из металлов с большой проводимостью для устранения нагрева за счет поверхностных токов. Экспериментальная оценка степени нагрева излучателя поверхностными токами при его работе представлена ниже.

Излучатель на волноводе нестандартного сечения. Согласно результатам расчетов, представленных выше, излучатель на волноводе сечения 90×45 мм не обеспечивает полное согласование с генератором на рабочей частоте, при котором КСВН = 1 ($S_{11} = 0$), так как сопротивление щели также зависит и от размеров волновода. Путем проведения серии численных расчетов подбирались такие размеры волновода и длины щели, которые обеспечивают резонанс и нулевое отражение на рабочих частотах 2,45 и 2,465 ГГц. Полученные размеры излучателей для данных частот приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оптимальные размеры излучателя и характеристики на нестандартных волноводах

Рабочая частота, ГГц	2,45		2,465	
Размеры волновода $a \times b$, мм	140×45	90×51	136×45	$90 \times 49,5$
Размеры щели $t_{щ} \times l_{щ}$, мм	$10 \times 59,7$	$10 \times 57,3$	$10 \times 59,3$	$10 \times 57,25$
S_{11} на f_p (в диапазоне ± 50 МГц)	0 (0,1... 0,095)	0 (0,098...0,098)	0 (0,11...0,08)	0 (0,11...0,08)

Распределения СВЧ-поля в ближней зоне щелевого излучателя. Расчеты проводились для излучателя на волноводе 90×45 мм со щелью 10×58 мм и рабочей частотой 2,45 ГГц.

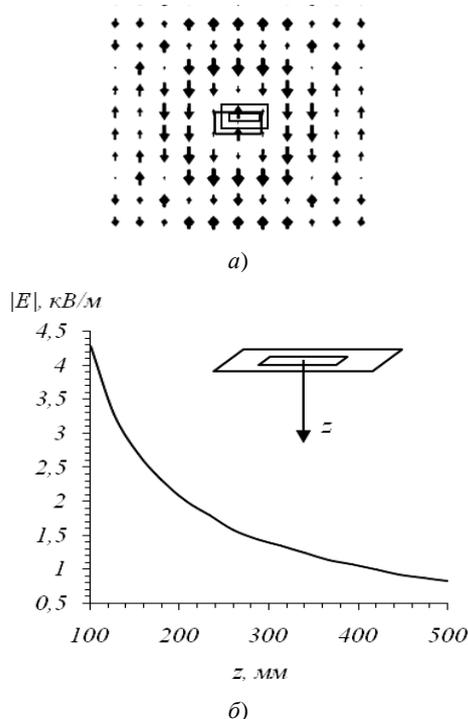


Рис. 4. Мгновенное распределение вектора электрической составляющей СВЧ-поля в ближней зоне излучателя на расстоянии 500 мм (а) и зависимость напряженности поля от расстояния от щели на оси при вводе 1 кВт (б)

Для некоторых задач СВЧ-нагрева, таких как СВЧ-нагрев анизотропных материалов (древесины), ориентация вектора напряженности СВЧ-поля по отношению к обрабатываемому материалу является критичной. Например, при ориентации вектора СВЧ-поля перпендикулярно волокнам древесины достигается большая глубина проникновения в 1,3...1,6 раза по сравнению с продольной ориентацией.

На рисунке 4, а представлено распределение вектора электрической составляющей излучаемого СВЧ-поля на расстоянии 500 мм от излучателя. Как видно, вектор напряженности лежит в Е-плоскости излучателя и перпендикулярен широкой стороне щели.

Для выбора оптимального расстояния от излучателя до материала потребуются знание напряженности поля на разном расстоянии от излучателя.

На рисунке 4, б представлен график значений напряженности поля при удалении от излучателя при мощности генератора 1 кВт.

Влияние смещения s (рис. 5) экрана от плоскости щели на распределение поля в ближней зоне проиллюстрировано рисунком 6, из которого видно, что смещение s заметно изменяет распределение поля в Е-плоскости излучателя с появлением выраженного бокового излучения.

Распределение поля в Н-плоскости при различных s существенно не различается.

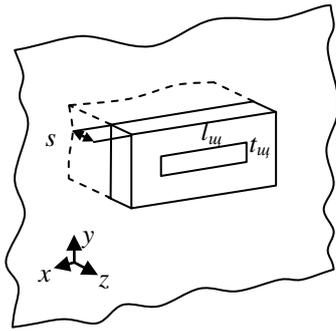


Рис. 5. Излучатель с экраном

Влияние смещения s на согласование излучателя незначительно: при увеличении s происходит незначительное смещение резонанса в сторону низких частот на 20...30 МГц.

Расчеты влияния экрана конечных размеров шириной L в Е-плоскости представлены на рисунке 7. Из рисунка видно, что отраженные от границ экрана диафрагмированные волны накладываются на основную волну щели, в результате чего картина поля становится неоднородной и диаграмма имеет изрезанность. Размеры экрана в Н-плоскости практически не влияют на распределение поля.

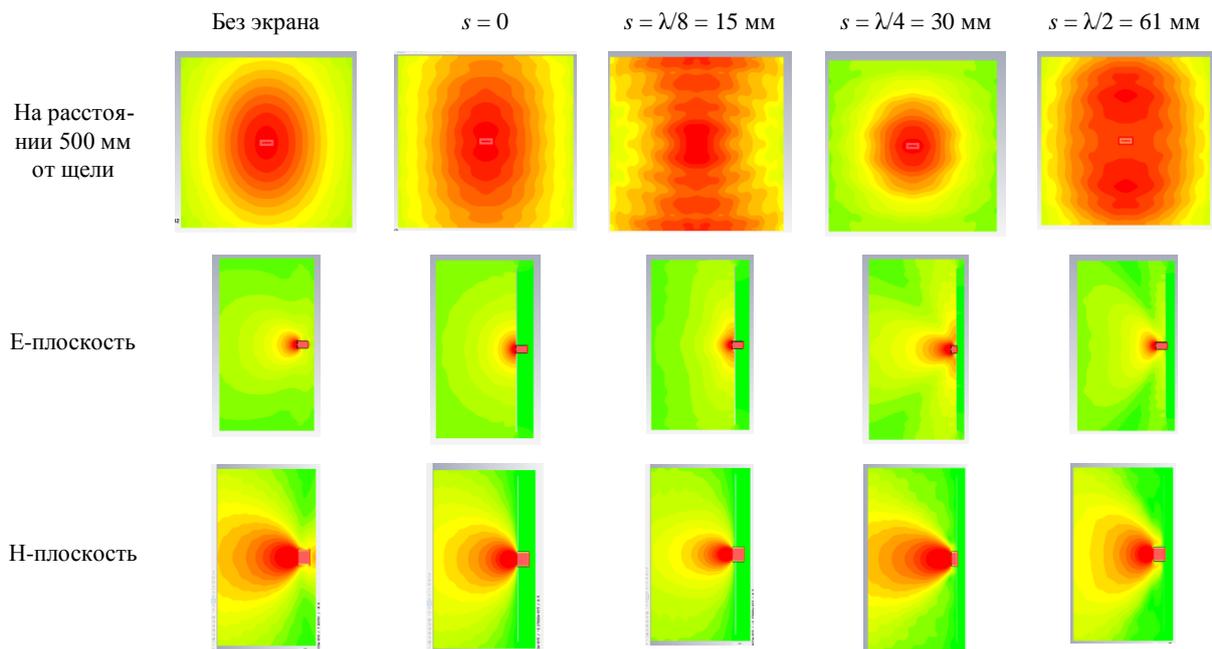


Рис. 6. Распределение СВЧ-поля в ближней зоне щелевого излучателя в 3-х плоскостях при различных s

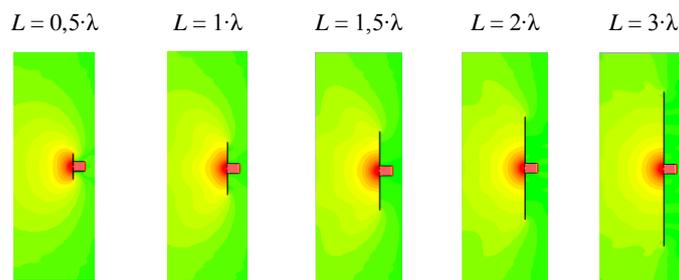


Рис. 7. Распределение напряженности электрической компоненты СВЧ-поля в ближней зоне излучателя в Е-плоскости с экраном конечных размеров

Выбор расстояний между излучателями в Е- и Н-плоскостях в камерах с многомагнетронной системой вода СВЧ-энергии. В таблице 3 представлены результаты моделирования, показывающие расстояние от излучателей до обрабатываемого материала R и соответствующие расстояния между излучателями в обеих плоскостях L_E и L_H , при которых обеспечивается перекрытие соседних излучений по уровню 0,707 напряженности электрического поля.

Из практических соображений для удобства выбора расстояний между излучателями данные, указанные в таблице 3, представлены в виде графиков на рисунке 8.

Таблица 3

Расстояния между излучателями в зависимости от расстояния до обрабатываемого материала

Расстояние до материала R , мм	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Расстояние между излучателями: - в Е-плоскости L_E , мм	420	600	800	1020	1260	1430	1610	1880	2100
- в Н-плоскости L_H , мм	245	360	490	600	720	860	930	1090	1170

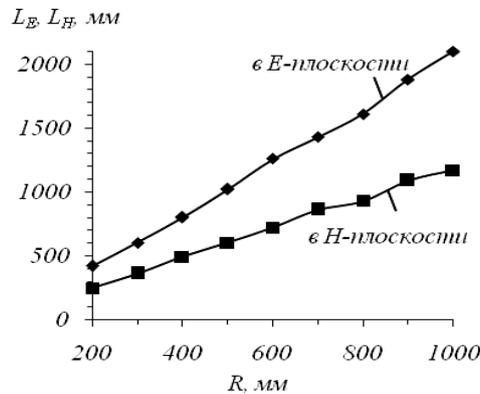


Рис. 8. Зависимость расстояний L_E и L_H между излучателями в обеих плоскостях от расстояния R до обрабатываемого материала, при которых достигается необходимое перекрытие полей соседних излучателей

При указанном расположении излучателей и расстоянии от них до материала будет обеспечиваться однородное температурное поле на поверхности материала при работе соседних излучателей. Однако приемлемая равномерность будет достигаться при попеременном включении генераторов соседних излучателей. При их одновременной работе будет возникать интерференция их полей с образованием участков максимумов и минимумов нагрева.

Для примера на рисунке 9 приведены результаты расчетов нагрева в течение 1000 с пластины в СВЧ-поле двух излучателей в Н-плоскости и Е-плоскости. Расчет проводился для случаев СВЧ-нагрева с попеременным включением генераторов с периодом 100 с и при одновременной работе на частоте 2,45 ГГц обоих генераторов. Параметры материала принимались произвольно: удельная теплоемкость $C_p = 3000$ Дж/(кг·К); плотность $\rho = 1000$ кг/м³; теплопроводность $\lambda = 0,2$ Вт/(м·К); диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1 - j0,05$; коэффициент теплообмена $\alpha = 0$.

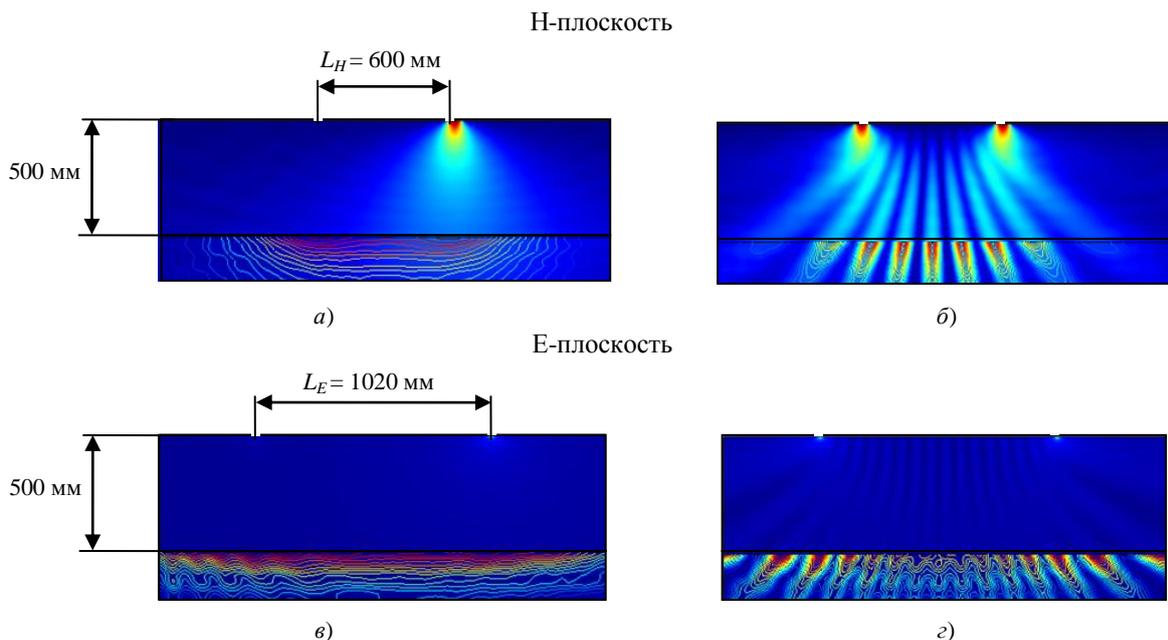


Рис. 9. Распределение температуры в материале от излучателей, установленных в Н-плоскости (а, б) и Е-плоскости (в, г) при попеременной работе магнетронов (а, в) и одновременном включении магнетронов (б, г)

Однако за счет того, что магнетроны работают не строго на одинаковых частотах, и наличия некоторой девиации частоты при работе магнетронов следует ожидать некоторого смещения зон максимумов вдоль материала с выравниванием теплового поля и снижением неравномерности нагрева.

Расчет работы излучателей проведен без учета отражений поля от боковых стенок камеры.

В Е-плоскости излучение щели происходит во всех направлениях, в том числе в направлении боковых стенок, от которых волна отражается в направлении щели. Для уменьшения влияния обратной волны целесообразно выбирать такие размеры камеры и размещение излучателей, чтобы расстояние между боковой стенкой камеры и щелью излучателя было кратно половине длины волны (рис. 10, а):

$$L' = n \cdot \lambda / 2, n - \text{целое число.}$$

Отраженные от боковых стенок камеры волны оказывают большое влияние на распределение СВЧ-поля в камере и тепловой мощности в материале. В связи с этим целесообразно в зоне боковых стенок в Е-плоскости камеры располагать материал, как показано на рисунке 10, б).

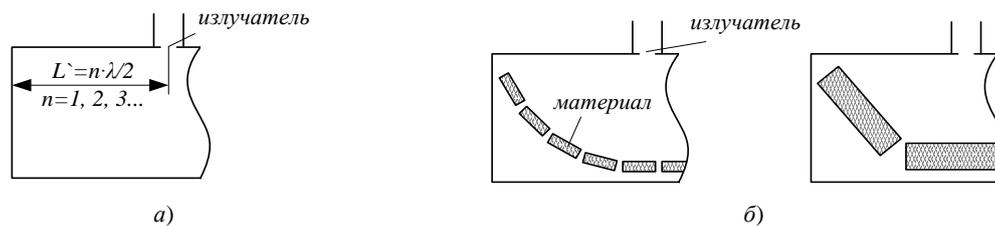


Рис. 10. К выбору расстояния между стенкой и излучателем (а) и возможное расположение нагреваемого материала в камере в Е-плоскости излучателя (б)

При падении волны на материал неизбежно будут возникать отраженные волны, которые, отразившись от стенок камеры, будут интерферировать с прямой волной излучателя и влиять на распределение тепловой мощности в материале. Значение степени отражения зависит от диэлектрической проницаемости материала, геометрии его поверхности и расположения относительно вектора падающего поля и для влажных материалов может достигать существенных значений.

В качестве примера на рисунке 11 приведены зависимости коэффициента отражения R СВЧ-поля от поверхности пластины из сырой древесины при различных ее влагосодержании и температуре для перпендикулярной (R_{\perp}) и параллельной (R_{\parallel}) ориентации вектора падающего поля относительно волокон древесины. Значения комплексной диэлектрической проницаемости ϵ древесины, взятые для расчета R , определялись по выражениям, полученным в [6].

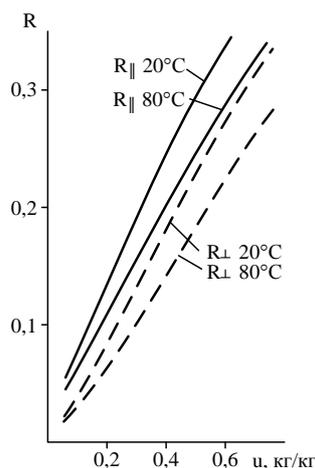


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения падающей СВЧ-волны на пластину из древесины от ее влагосодержания и температуры

Видно, что для более влажной древесины значения R выше. Так, при температуре пластины 20°C с влагосодержанием, равным $0,6 \text{ кг/кг}$, и перпендикулярной ориентации вектора поля R составит $0,25$, или по мощности 6% . При более высоких температурах R меньше, что связано с уменьшением значений ϵ воды, содержащейся в древесине, при увеличении температуры. При перпендикулярной ориентации

вектора поля относительно волокон древесины R также меньше, чем при параллельной ориентации. Поэтому для минимизации явлений интерференции и улучшения равномерности распределения поля СВЧ-сушку пиломатериалов целесообразно проводить при перпендикулярной ориентации СВЧ-поля и больших температурах.

Экспериментальные исследования. Были изготовлены щелевые излучатели из листовой оцинкованной стали толщиной 0,5 мм для волновода 90×45 мм и размерами щели $10 \times 57,5$ мм для работы с магнетроном OM75P мощностью 1 кВт и $f_p = 2,465$ ГГц. Измеренный КСВН излучателя при помощи волноводной измерительной линии на частоте 2,465 ГГц составил 1,22 ($S_{11} \approx 0,1$), что хорошо согласуется с численными расчетами.

Данные излучатели встраивались в верхнюю стенку прямоугольной СВЧ-камеры с размерами $70 \times 70 \times 120$ см (рис. 12).

Для оценки нагрева излучателя поверхностными токами проводился пробный СВЧ-нагрев воды в емкостях, расположенных на поддоне под излучателем. Измерение температуры осуществлялось тепловизором Flir ThermoCAM E300 каждые 2 минуты при выключенном генераторе до достижения установившегося температурного распределения. После 20 минут работы излучателя его температура составила 50°C и больше не повышалась.



Рис. 12. Внешний вид излучателя в СВЧ-камере

Проводились исследования СВЧ-нагрева влажных досок в поле одного излучателя. Доски толщиной 3 см и длиной 50 см с влажностью 60...80 % были уложены над металлическим поддоном на диэлектрических прокладках толщиной $\lambda/4 = 3$ см. Расположение досок в камере соответствовало перпендикулярной ориентации волокон досок вектору напряженности электрической составляющей СВЧ-поля, возбуждаемого щелью. На рисунке 13 представлены тепловизионные снимки СВЧ-нагрева досок в течение 10 мин при их расположении на расстоянии 16 см (рис. 13, а) от излучателя и в течение 10 и 20 мин на расстоянии 32 см от излучателя (рис. 13 б, в).

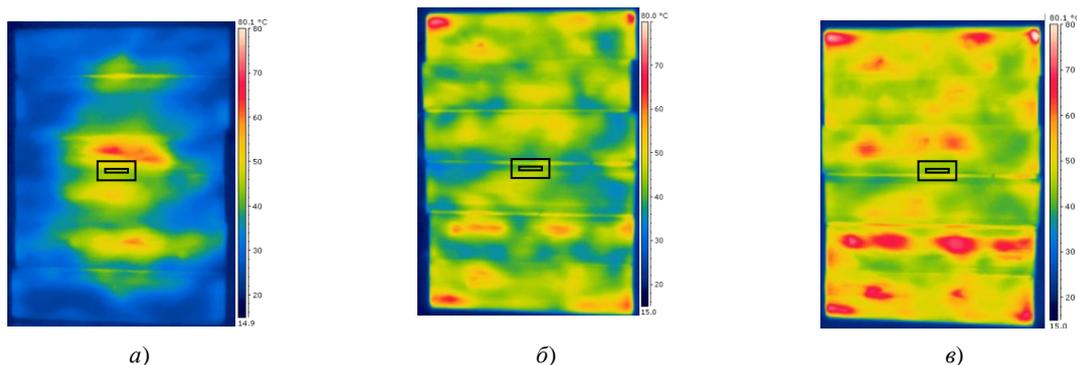


Рис. 13. Тепловизионные снимки:

- а – после 10 минут СВЧ-нагрева досок на расстоянии 16 мм от излучателя;
 б – после 10 минут нагрева досок на расстоянии 32 см, в) после 20 минут нагрева досок на расстоянии 32 см.
 (прямоугольником показано расположение излучателя и щели)

Как видно, на термограммах присутствуют области повышенного нагрева, обусловленные интерференцией прямой волны излучателя и вторичных волн, отраженных от поверхности досок и стенок камеры.

На рисунке 14 представлено распределение температуры на поверхности досок после их 15 минутного нагрева в СВЧ-поле двух излучателей, работающих одновременно. Доски располагались на расстоянии 30 см от излучателей.

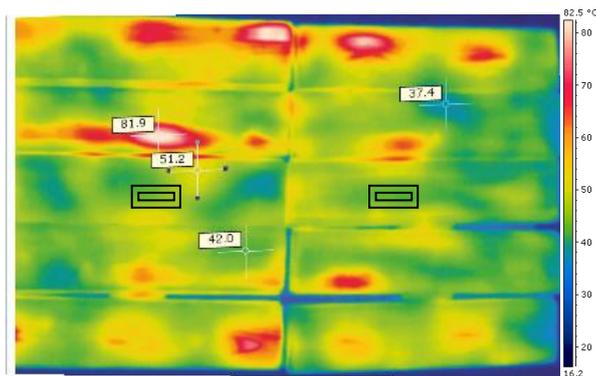


Рис. 14. Распределение теплового поля на поверхности досок после 15 минутного нагрева СВЧ-полем в камере с двумя излучателями

Заключение. Для камер СВЧ-нагрева предложены простые по конструкции и изготовлению излучатели в виде одиночной щели в торце прямоугольного волновода, которые хорошо согласуются с генератором. В частности, для термообработки энергией СВЧ-поля частотой 2,45 и 2,645 ГГц с применением бытовых магнетронов можно рекомендовать излучатели на стандартном волноводе 90×45 мм или нестандартных волноводах со щелями в торце, размеры и расчетные параметры которых приведены в таблицах 1 и 2. Согласно экспериментальным данным, излучатели обладают малым самонагревом поверхностными токами даже без применения покрытия высокопроводящими металлами, а также обладают большим запасом по пробивной напряженности поля.

Излучатели позволяют создавать одно- и двухмерные антенные решетки для увеличения площади и мощности облучения. Определение расстояний между излучателями, устанавливаемыми в камере, при заданном расстоянии до обрабатываемого материала можно производить по рисунку 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочержевский, Г.Н. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
2. Антенны и устройства СВЧ / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. радио, 1972. – 320 с.
3. Жук, М.С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Е. Молочков. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 648 с.
4. Айзенберг, Г.З. Антенны ультракоротких волн / Г.З. Айзенберг. – М.: Радио и связь, 1957. – 699 с.
5. Куртенков, Г.Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного оборудования / Г.Е. Куртенков. – Томск: ИНТЛ, 1999. – 276 с.
6. Адамович, А.Л. Определение комплексной диэлектрической проницаемости древесины в СВЧ-диапазоне / А.Л. Адамович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 37 – 43.

Поступила 12.07.2012

SLOT IRRADIATOR FOR BEAM CHAMBER OF MICROWAVE HEATING AND DRYING OF MATERIALS

A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG, Y. MATELENOK, O. KIZINA, T. BULBENKOVA

The computer model-based calculation and parametric optimization of irradiators in a butt slot form with screen that are meant to work at the beam microwave heating and drying of materials chambers with operating frequencies of the domestic magnetrons at 2,45 and 2,465 GHz are carried out. The computer modeling of the microwave field distribution at the distance of the irradiator in condition of screen offset and finite sizes is carried out. The data for choosing of distances between adjacent irradiators at chambers with multimagnetron excitation to reach tolerant uniform of microwave field distribution in a material are cited. Voltage standing-wave ratio (VSWR) of irradiator measurements results are represented, the estimation of irradiator heating by means of surface currents during its operating at the chamber is carried out. Thermal imaging photos of microwave heating of wet lumbers at the chamber during the radiation both by single irradiator and by two irradiators are represented.