

DOI

УДК 631.243.33:519.673

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ УСТАНОВОК.
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. Васильев, А. Н. Васильев, Д. А. Будников, Ю. А. Собченко

Реферат. Исследования проводили с целью моделирования распределения электромагнитного поля для оценки эффективности трех видов излучателей по следующим параметрам: коэффициент стоячей волны, позволяющий сравнить согласованность излучателей; радиационная эффективность, показывающая величину энергии, передаваемой в зерновой слой; диаграмма направленности микроволнового поля, позволяющая оценить равномерность распределения поля в зерновом слое. Для оценки и сравнения рассматривали три типа волноводов: рупорные, прямоугольные с щелевыми излучателями; полукруглые с щелевыми излучателями. Моделировали распределение электромагнитного поля с использованием программы CST Microwave Studio. Применение рупорных волноводов в сверхвысокочастотных конвективных установках позволяет изготавливать достаточно простые устройства для обработки зерна. Коэффициент стоячей волны для рабочей частоты в этом случае равен 1,3, при радиационной эффективности 78 дВ. Однако они не обеспечивают равномерность распределения поля сверхвысокой частоты на выходе из волновода, что сказывается на эффективности обработки зерна. Использование прямоугольных волноводов 55 мм × 110 мм с щелевыми излучателями обеспечивает более равномерное излучение электромагнитного поля во всём спектре типов волн. Коэффициент стоячей волны равен 1,0, а радиационная эффективность – 94,43 дВ. Однако их применение требует дополнительных конструктивных разработок для обеспечения подвода теплоносителя в зону обработки. Полукруглые волноводы с щелевыми излучателями обеспечивают коэффициент стоячей волны, равный 1,0 на всём диапазоне частот от 2 до 3 ГГц. Радиационная эффективность составляет 94,28 дВ. Равномерность распределения электромагнитного поля вдоль полукруглого волновода лучше, чем вдоль прямоугольного.

Ключевые слова: электромагнитное поле сверхвысокой частоты, волновод, щелевой излучатель, радиационная эффективность.

Введение. Использование поля сверхвысокой частоты (СВЧ) для обработки зерна при сушке, обеззараживании и предпосевной обработке, позволяет снизить энергозатраты и увеличить производительность установок [1, 2, 3]. При предпосевной обработке имеется возможность совмещать обеззараживание семян с влиянием на их посевные качества и структуру урожая [4, 5, 6].

Одним из недостатков применения СВЧ поля при обработке зерна выступает

зависимость глубины его проникновения в зерновой слой от диэлектрических свойств материала. Чем выше влажность зерна, тем меньше глубина проникновения поля в зерновой слой, тем большая мощность выделяется в зерне, прилегающем к источнику излучения.

Авторами разработана СВЧ – конвективная сушилка на базе модуля, в котором источники поля расположены по противоположным сторонам зоны обработки зерна [7] (рис. 1).

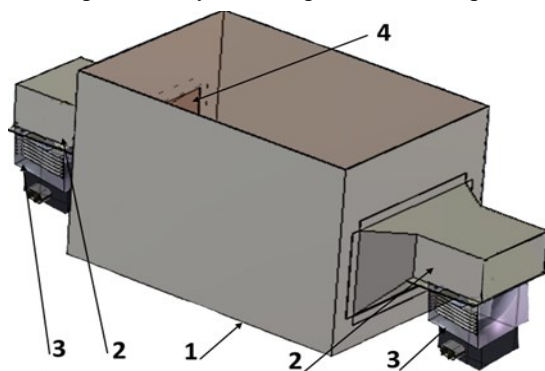


Рис. 1 – Внешний вид СВЧ – конвективной зоны для обработки зерна: 1 – корпус СВЧ – конвективной зоны; 2 – волноводы; 3 – магнетроны; 4 – выходное отверстие волновода

Размеры модуля в установке составляют 0,3×0,2×0,2 м с объёмом внутреннего пространства 0,012 м³. Длина зоны – расстояние между выходными отверстиями волноводов 4 – составляет 0,3 м. Объём зерна пшеницы, который может обрабатываться в конвективной зоне СВЧ составляет от 8 кг при влажности 25%, до 9,1 кг – при влажности 14%.

Предпосевную обработку и обеззараживание зерна проводят, как правило, при влажности зерна пшеницы не более 14%. При сушке исходная влажность зерна может варьировать в широких пределах – 18...30%.

В модуле использовали магнетроны мощностью 0,9 кВт с частотой излучения 2,45 ГГц. Излучение в СВЧ – активную зону

осуществляется с использованием рупорных антенн. Экспериментальные исследования процесса сушки и обеззараживания зерна показали [8, 9] неравномерность распределения электромагнитного СВЧ поля в зерновом слое, снижающую эффективность обработки зерна. Поэтому возникла необходимость в разработке новых конструктивных решений по подаче микроволнового поля в плотный слой зерна.

В качестве альтернативы рупорным антеннам рассматривали возможность использования прямоугольных и полукруглых волноводов с щелевыми излучателями. В этом случае излучающий волновод располагали непосредственно в активной зоне. Для сравнения

эффективности этих конструкций проводили математическое моделирование распределения поля СВЧ на выходе этих волноводов с использованием программы CST Microwave Studio [10, 11].

Цель исследования – моделирование распределения электромагнитного поля для оценки эффективности трех видов излучателей.

Условия, материалы и методы. Анализ показателей эффективности и распределения электромагнитного поля СВЧ проводили для трёх типов излучателей: рупорного излучателя (рис. 2); прямоугольного волновода размером 55 мм × 110 мм с щелевыми излучателями (рис. 3) и полукруглого волновода с щелевыми излучателями (рис. 4).

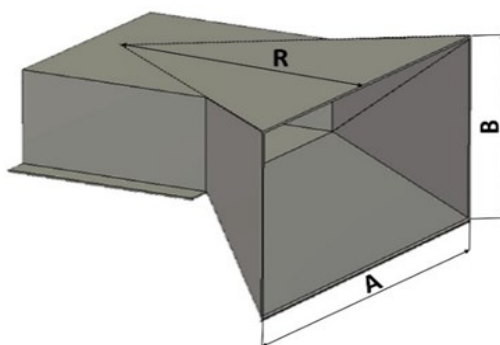


Рис. 2 – Внешний вид рупорного излучателя

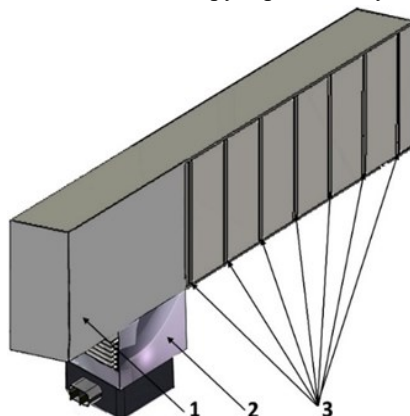


Рис. 3 – Внешний вид волновода 55 мм × 110 мм с щелевыми излучателями: 1 – корпус волновода; 2 – магнетрон; 3 – щелевые излучатели, расположенные на расстоянии $\frac{1}{2} \lambda$

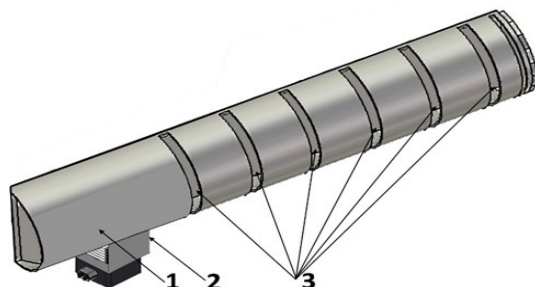


Рис. 4 – Внешний вид волновода полукруглого сечения с щелевыми излучателями: 1 – корпус волновода; 2 – магнетрон; 3 – щелевые излучатели, расположенные на расстоянии $\frac{1}{2} \lambda$

Для моделирования использовали метод конечного интегрирования (FIT). Он представляет собой схему пространственной дискретизации для численного решения задач электро-

магнитного поля во временной и частотной областях. Использование этого метода дает возможность учитывать такие основные топологические свойства непрерывных уравнений,

как сохранение заряда и энергии. Основная идея рассматриваемого подхода заключается в применении уравнений Максвелла в интегральной форме к набору сеток, расположенных в шахматном порядке [10]:

$$\oint_{(\Gamma)} (H, dl) = \int_{(S)} \left(j + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dS, \quad (1)$$

$$\oint_{(\Gamma)} (E, dl) = - \int_{(S)} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) dS, \quad (2)$$

$$\oint_{(S)} (D, dS) = \int_V \rho dV, \quad (3)$$

$$\oint_{(S)} (B, dS) = 0, \quad (4)$$

где E – напряжённость электрического поля, В/м; H – напряжённость магнитного поля, А/м; B – магнитная индукция, Тл; D – электрическая индукция, Кл/м²; Γ – контур, ограничивающий поверхность, м²; S – произвольная поверхность, м²; V – объём, м³; j – плотность электрического тока, А/м²; l – замкнутый контур, м; ρ – плотность электрического заряда, Кл/м³; t – время, с.

Суть метода заключается в разбиении вычислительной области на конечное число объёмных ячеек. Ячейки сформированы так, что пересечение двух различных ячеек, выступает либо пустым местом, либо многоугольником, имеющим одномерный край, либо точкой, которая входит в две ячейки. При такой схеме разложения образуется конечная сетка интегрирования, которая и служит вычислительной сеткой.

Конструкции, которые применяют в моделировании с использованием CST Microwave Studio, создают посредством черчения простейших геометрических форм, что позволяет изображать достаточно сложные объекты [11].

Эффективность излучателей оценивали по следующим показателям:

коэффициент стоячей волны (КСВ), который позволяет оценить согласованность излучателя;

радиационная эффективность, которая показывает величину энергии, передаваемой от магнетрона волноводом;

диаграмма направленности микроволнового поля, которая строится в 3D формате, что позволяет оценить равномерность распределения электромагнитного поля на выходе излучателя;

распределение излучаемой мощности СВЧ поля.

Результаты и обсуждение. При исследовании распределения электромагнитного поля СВЧ рупорного излучателя использовали рупорную антенну, представляющая собой комбинацию Н-секториального и пирамидального рупоров [12, 13]. Верхняя грань рупора выполнена как Н-секториальный, а нижняя, как пирамидальный (рис. 2).

Коэффициент направленного действия

(КНД) апертурной антенны определяется по формуле [14]:

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \gamma, \quad (5)$$

где S – площадь раскрытия, м²; λ – длина волны излучения, м; γ – коэффициент использования поверхности (КИП), зависящий от амплитудного и фазового распределения поля в раскрытии, о.е.

Максимальный КИП $\gamma = 1$ достигается при равномерно и синфазно возбужденном раскрытии.

Амплитудное распределение поля в раскрытии рупора в первом приближении представляется синусоидальным в плоскости вектора H [13]:

$$\frac{E(y)}{E_{max}} \approx \sin\left(\frac{\pi y}{B}\right), \quad (6)$$

где B – размер раскрытия вдоль оси y (рис. 2); $E(y)$ – напряжённость электромагнитного поля по оси y , В/м; E_{max} – максимальная напряжённость электромагнитного поля в раскрытии, В/м.

Фаза поля в раскрытии вследствие криволинейности фронта волны меняется приблизительно по квадратичному закону. На его краях сдвиг максимален и составляет:

$$\Phi_{max} \approx \frac{\pi A^2}{4\lambda R}. \quad (7)$$

Если увеличить размер раскрытия A при постоянной длине рупора R (см. рис. 2), то произойдет увеличение площади раскрытия S и одновременное уменьшение КИП вследствие роста фазовой неравномерности. В разработанной авторами установке для $A=155$ мм и $R=80$ мм максимальный сдвиг составил, что допустимо.

Для моделирования процесса распределения электромагнитного поля СВЧ использовали модель рупорного волновода (рис. 2). Диапазон частот составлял от 2 ГГц до 3 ГГц, с центральными точками 2,45 ГГц и 2,5 ГГц. Результаты моделирования свидетельствуют (рис. 5), что КСВ для частоты излучения магнетрона находятся около 1,3, что служит свидетельствует о достаточной согласованности излучателя. Радиационная эффективность на частотах излучения магнетронов имеет максимум, что также отражает хорошую согласованность излучателя.

Результаты проведённых ранее экспериментальных исследований [7] свидетельствуют, что энергоёмкость процесса сушки зерна в СВЧ-конвективных зонах достоверно зависит от параметров агента сушки и от схемы его подачи в зону сушки зерна. Наименьшие энергозатраты отмечены при совпадении направления подачи в зерновой слой поля СВЧ и агента сушки [7].

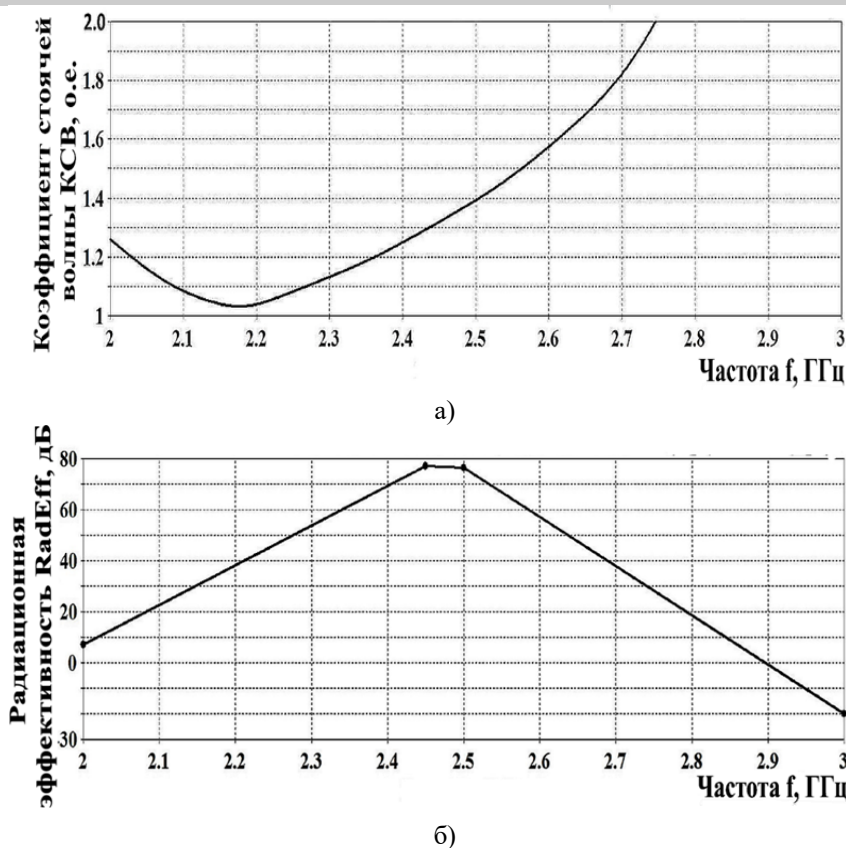


Рис. 5 – Зависимости, полученные при моделировании поля СВЧ для рупорного излучателя: а) изменение коэффициента стоячей волны; б) изменение радиационной эффективности

При этом необходимо обеспечить равномерность распределения и микроволнового поля и агента сушки в зерновом слое. В варианте конструкции СВЧ-конвективной зоны с рупорными волноводами такие условия выполнить затруднительно. Поэтому предпринята попытка разработать такую конструкцию волноводов, при которой они могут быть реализованы.

При исследовании прямоугольных волноводов с целевыми излучателями принято, что в качестве источника СВЧ энергии используют магнетрон частотой 2,45 ГГц. Длина волны от генератора [14]:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{8}$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

При частоте 2,45 ГГц длина волны будет равна

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{2,45 \cdot 10^9}.$$

$$\lambda = 0,122 \text{ м} = 122 \text{ мм}.$$

В СВЧ устройствах важно работать с конкретными типами волн. Например, H_{10}, H_{01}, E_{11} [15, 16]. При использовании электромагнитного поля СВЧ для нагрева в этом нет необходимости. Важно обеспечить передачу к нагрузке полной мощности излучения. Поэтому ориентировка была взята

на многоволновые волноводы. Кроме того, увеличение размеров поперечного сечения к длине волны позволяет повысить электрическую прочность волновода и снизить потери [17]. Рассмотрим, какие типы волн будут передаваться в прямоугольном волноводе. Для этого построим диаграмму критических длин волн для магнитного и электрического типа колебаний. Принимая

$$a = 2b, \tag{9}$$

где a – широкая стенка прямоугольного волновода; b – узкая стенка прямоугольного волновода.

Критические длины волн для магнитных и электрических типов определяются из соотношения (*Антенны, СВЧ-устройства и их технологии* / Ю. Б. Нечаев, В. И. Николаев, Р. Н. Андреев и др. Воронеж: ОАО Концерн «Созвездие», 2008. 629 с.):

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \tag{10}$$

где m и n – индексы типа колебания $H_{mn}(E_{mn})$. У E – волн

$$m \geq 1, n \geq 1$$

Для H -волн один из индексов может быть равен нулю [18].

Для распространения колебаний всех типов по волноводу необходимо, чтобы

выполнялось условие:

$$\lambda < \lambda_{кр} \quad (11)$$

Для типа волны уравнение (7) будет иметь следующий вид:

$$122 < 2 \cdot a$$

Рекомендуемые ГОСТ 51914-2002 размеры прямоугольных волноводов для близких исследуемых частот будут следующими:

диапазон частот 1,72...2,59 ГГц – сечение 110,00 мм × 55,00 мм;

диапазон частот 2,14...3,2 ГГц – сечение 90,00 мм × 45,00 мм.

С учетом того, что поле СВЧ в установке должно быть максимально равномерно распределено в зерновом слое, было принято, что сечение волновода 110 мм × 55 мм в большей степени соответствует этому требованию. То

есть, критическая длина волны в этом волноводе составляет

$$\lambda_{кр} = 2 \cdot 110 = 220 \text{ мм}$$

Следовательно, принятый размер волновода удовлетворяет требованию (11).

На его основе был разработан целевой излучатель [18], в волноводе которого нарезали поперечные щели. Поперечная щель в широкой стенке волновода возбуждается продольной составляющей тока. Исходя из требуемого объема секции длина излучателя принята равной 400 мм. Щели на боковой стенке излучателя расположены одна от другой на расстоянии $\frac{1}{2} \lambda$ (рис. 3).

После согласования параметры излучателя были заданы в программе CST Microwave Studio и выполнено моделирование распределения электромагнитного поля из щелей излучателя (рис. 6).

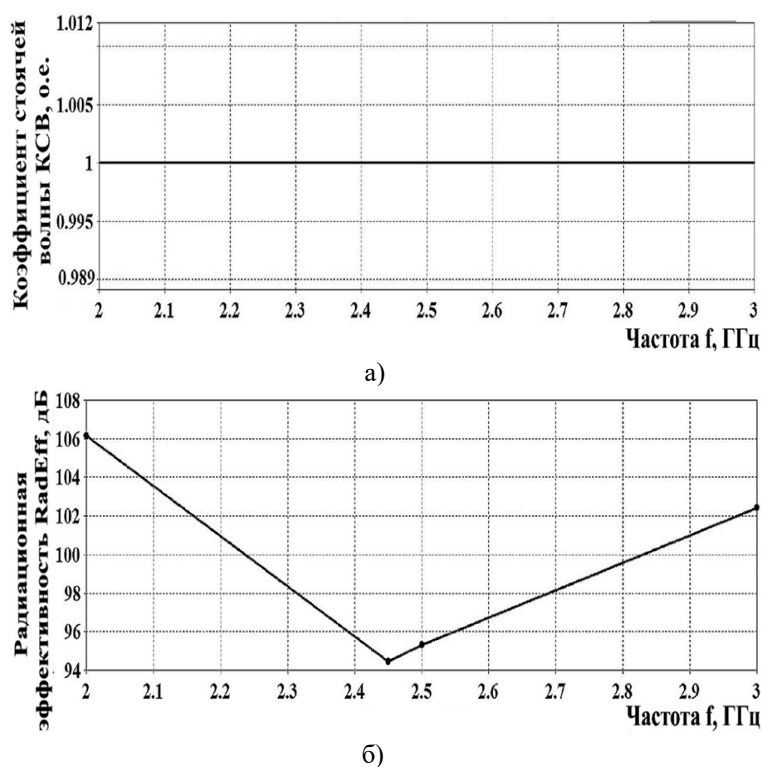


Рис. 6 – Зависимости, полученные при моделировании поля СВЧ для прямоугольного щелевого излучателя 55 мм × 110 мм: а) изменение коэффициента стоячей волны; б) изменение радиационной эффективности

Результаты моделирования свидетельствуют, что использование прямоугольного волновода обеспечивает более равномерное распределение электромагнитного поля. При этом у прямоугольного волновода КСВ равен 1 и увеличено значение излучаемой мощности. Следовательно, использование прямоугольного волновода 55 мм × 110 мм в СВЧ-конвективных зонах для обработки зерна более предпочтительно.

Выбор полукруглого волновода с щелевыми излучателями (рис. 4) обусловлен прежде всего технологическими особенностями про-

цесса СВЧ-конвективной обработки.

Для его реализации необходимо использовать подачу агента сушки в зону обработки материала. Конструктивно это удобнее реализовать именно с волноводами полукруглого сечения.

В круглом волноводе для волн типа E_{mn} критическую длину волны можно рассчитать из уравнения [19, 20]:

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi r}{u_{mn}}, \quad (12)$$

а для волн типа H_{mn}

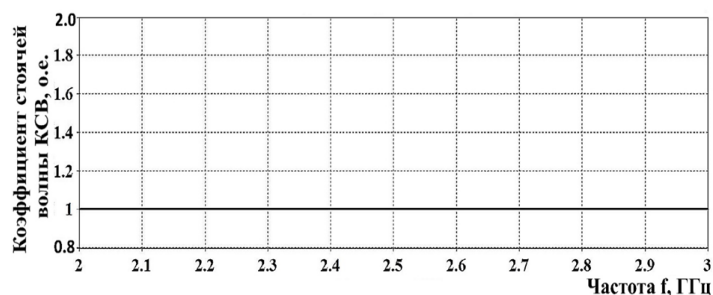
$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi r}{u'_{mn}}, \quad (13)$$

где r – радиус волновода; u_{mn} – корни для функции Бесселя и их производных для волн типа E ; u'_{mn} – корни для функции Бесселя и их производных для волн типа H .

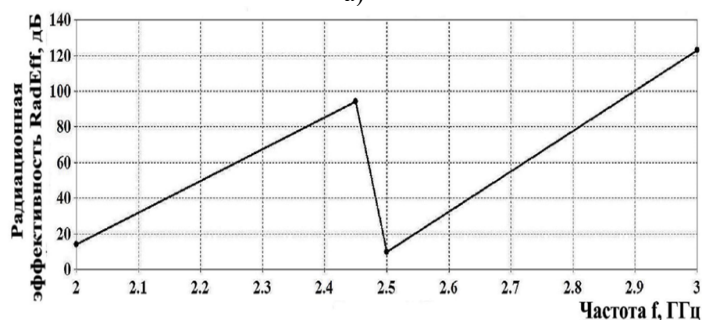
При внутреннем радиусе волновода 50 мм критическая длина волны для волн H типа $\lambda_{кр} = 170$ мм, для волн E типа $\lambda_{кр} = 82$ мм. Судя по величине критической длины волны при радиусе волновода 50 мм распространение электромагнитных волн E_{11} типа

затруднительно. Распространяться будут в основном волны типа H_{11} .

Результаты моделирования свидетельствуют, что согласование полукруглого волновода с щелевыми излучателями позволило получить $KCB = 1$ на всём диапазоне частот от 2 до 3 ГГц. Радиационная эффективность передачи электромагнитного поля составила 94,28 дБ (рис. 7б), по сравнению с 94,43 дБ для волновода размером 55 мм × 110 мм (см. рис. 6б). Если посчитать, что снижение радиационной эффективности в полукруглом волноводе произошло из-за отсутствия волн типа E_{11} , то на их долю приходится только 0,15 дБ. Это составляет не более 0,16% от общей энергии, передаваемой по волноводу.



а)



б)

Рис. 7 – Показатели эффективности волновода полукруглого сечения: а) коэффициент стоячей волны; б) радиационная эффективность

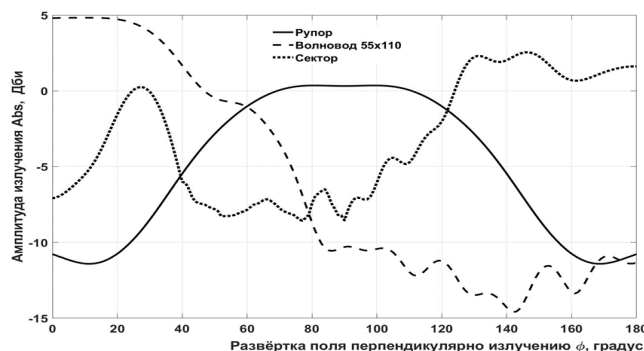


Рис. 8 – Диаграммы направленности излучения поля СВЧ на выходе трёх исследуемых излучателей

Сравнение диаграмм направленности излучения трёх волноводов (рис. 8) показывает, что для полукруглого волновода с щелевыми излучателями она более равномерна, чем для прямоугольного волновода размером 55 мм × 110 мм. Это позволяет утверждать,

что использование более технологичных полукруглых волноводов не ухудшает эффективности передачи и распределения электромагнитного поля.

Выводы. Применение рупорных волноводов в СВЧ – конвективных установках

позволяет изготавливать достаточно простые установки для обработки зерна. Их КСВ для рабочей частоты равен 1,3, при радиационной эффективности 78 дВ. Однако такие волноводы не обеспечивают равномерность распределения поля СВЧ на выходе из волновода, что сказывается на эффективности обработки зерна.

Использование прямоугольных волноводов 55 мм × 110 мм с щелевыми излучателями обеспечивает более равномерное излучение электромагнитного поля во всём спектре типов волн. КСВ равен 1,0, а радиационная эффективность 94,43 дВ. Однако их

применение требует дополнительных конструктивных разработок для обеспечения подвода теплоносителя в зону обработки.

Применение полукруглых волноводов с щелевыми излучателями обеспечивает КСВ, равный 1,0 на всём диапазоне частот от 2 до 3 ГГц. Радиационная эффективность составляет 94,28 дВ.

Равномерность распределения электромагнитного поля вдоль полукруглого волновода лучше, чем вдоль прямоугольного. Кроме того, при использовании полукруглых волноводов проще решать проблему подачи теплоносителя в зону обработки зерна.

Литература

1. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars / R. M. Bruce, G. G. Atungulu, S. Sadaka, et al. // *Cereal Chemistry*. 2021. Vol. 98. No. 3. P. 557–570. doi: 10.1002/cche.10398.
2. Abano E. E. Kinetics and Quality of Microwave-Assisted Drying of Mango (*Mangifera indica*) // *International Journal of Food Science: [hindawi.com]*. [2016]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijfs/2016/2037029> (дата обращения: 11.12.2023).
3. Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) / S. G. Walde, K. Balaswamy, V. Velu, et al. // *Journal of Food Engineering*. 2022. Vol. 55. P. 271–276.
4. Беспалько В. В., Буряк Ю. И. Влияние предпосевной обработки семян микроволновым полем в сочетании с регулятором роста и биопрепаратом на посевные качества и урожайные свойства ячменя ярового // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2014. № 4 (12). С. 133–138.
5. Method and System of Pre-Sowing Microwave Treatment of Agricultural Crop Seeds / A. V. Kovalev, O. B. Spiridonov, I. E. Lysenko, et al. // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020. Vol. 13. P. 3964–3969.
6. Dynamic Arches Destruction by a Bulk Material Flow Separator: A Case Study of the Separator Usage in Microwave Grain Processing Plants / A. A. Vasilyev, A. N. Vasilyev, D. Budnikov, et al. // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. P. 997. URL: <https://www.mdpi.com/journal/agronomy> (дата обращения: 11.12.2023). doi: 10.3390/agronomy12050997.
7. Будников Д. А., Васильев А. Н., Васильев А. А. Проектирование рабочих зон установок СВЧ-конвективной обработки зерна путем электродинамического моделирования. Орёл: Каргуш, 2022. 348 с.
8. Малахов А. Н., Вендин С. В. Устройство и способ управления СВЧ-обработкой семян на конвейерной ленте // *Агроинженерия*. 2021. № 4 (104). С. 59–65. doi: 10.26897/2687-1149-2021-4-59-65.
9. Li Z. Y., Wang R. F., Kudra T., Uniformity issue in microwave drying // *Drying Technology*. 2011. Vol. 29. No. 6. P. 652–660.
10. Колесников С. М., Трефилов Д. Н., Дементьев А. Н. Проектирование и оптимизация полоскового излучателя с использованием пакета CST Microwave Studio // *Радиопромышленность*. 2015. № 4. С. 98–106.
11. Фатеев А. В. Применение ПО CST Microwave Studio для расчёта микроволновых антенн и устройств СВЧ. Томск: ТУСУР, 2017. 115 с. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/7145> (дата обращения: 11.12.2023).
12. Янушкевич В. Ф. Антенны и устройства СВЧ. Новополоцк: ПГУ, 2009. 360 с.
13. Оценка величины СВЧ-мощности группирователя в повторном магнитном поле / К. А. Кузьмин, С. М. Морозов, И. В. Павлов и др. // *Аграрный научный журнал*. 2020. №6. С.98–104. doi: 10.28983/asj.y2020i6pp98-104.
14. Четвериков Е. А., Моисеев А. П., Лягина Л. А. Совершенствование способов возбуждения электромагнитного поля СВЧ-диапазона в установках сушки сельскохозяйственной продукции стационарного типа // *Аграрный научный журнал*. 2016. № 6. С. 70–72.
15. Пименов В. Ю., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2002. 536 с.
16. Исаев А. В., Бастрон А. В., Яхонтова В. С. Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты на их энергию прорастания и всхожесть // *Вестник КрасГАУ*. 2016. № 4 (115). С. 131–137.
17. Кузьмин К. А., Сокорева Е. В. Перестраиваемый резонатор системы энергоотбора // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 1. С. 65–67. doi: 10.28983/asj.y2020i1pp65-67.
18. Петров Р. В. Исследование магнитоэлектрического щелевого резонатора СВЧ-диапазона // *Инженерная физика*. 2012. № 1. С. 33–38.
19. Завалий А. А., Воложанинов С. С., Воложанинова Н. В. Разработка щелевого СВЧ-излучателя для обработки почвы, семян и растений // *Инновационные технологии в науке и образовании: Конференция «ИТНО 2022»*. Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ, 2022. С. 69–74.
20. Зиганшин Б. Г., Жданкин М. В., Белова М. В. Разработка и обоснование параметров СВЧ установки со сферическим резонатором для термообработки боенских отходов // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2017. Т. 12. № 2 (44). С. 75–80. doi: 10.12737/article_59ad077c11ab76.96305845.

Сведения об авторах:

Васильев Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на биологические объекты и материалы, e-mail: lex.of@mail.ru

Васильев Алексей Николаевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатория электрофизического воздействия на биологические объекты и материалы, e-mail: vasiliev-viesh@inbox.ru

Будников Дмитрий Александрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории

электрофизического воздействия на биологические объекты и материалы, e-mail: dimm13@inbox.ru
Собченко Юрий Александрович – кандидат технических наук, ведущий специалист лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий, e-mail: yuri217@rambler.ru
Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ», г. Москва, Россия.

RADIANTS FOR MICROWAVE-CONVECTIVE INSTALLATIONS. SIMULATION RESULTS
A. A. Vasilev, A. N. Vasilev, D. A. Budnikov, Yu. A. Sobchenko

Abstract. The studies were carried out to simulate the distribution of the electromagnetic field to assess the efficiency of three types of emitters according to the following parameters: standing wave coefficient, which makes it possible to compare the consistency of emitters; radiation efficiency, showing the amount of energy transferred to the grain layer; microwave field radiation pattern, which allows one to evaluate the uniformity of the field distribution in the grain layer. For evaluation and comparison, three types of waveguides were considered: horn, rectangular with slot emitters; semicircular with slot emitters. The distribution of the electromagnetic field was modeled using the CST Microwave Studio program. The use of horn waveguides in ultra-high-frequency convective installations makes it possible to produce fairly simple devices for grain processing. The standing wave coefficient for the operating frequency in this case is 1.3, with a radiation efficiency of 78 dB. However, they do not ensure uniform distribution of the ultrahigh frequency field at the exit from the waveguide, which affects the efficiency of grain processing. The use of rectangular waveguides 55 mm × 110 mm with slot emitters ensures more uniform radiation of the electromagnetic field across the entire spectrum of wave types. The standing wave ratio is 1.0 and the radiation efficiency is 94.43 dB. However, their use requires additional design developments to ensure the supply of coolant to the processing zone. Semicircular waveguides with slot emitters provide a standing wave ratio of 1.0 over the entire frequency range from 2 to 3 GHz. Radiation efficiency is 94.28 dB. The uniformity of the electromagnetic field distribution along a semicircular waveguide is better than along a rectangular one.

Key words: ultrahigh frequency electromagnetic field, waveguide, slot emitter, radiation efficiency.

References

1. Bruce RM, Atungulu GG, Sadaka S. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chemistry*. 2021; Vol.98. 3. 557-570 p. doi: 10.1002/cche.10398.
2. Abano EE. Kinetics and quality of microwave-assisted drying of Mango (*Mangifera indica*). [Internet]. *International Journal of Food Science*: [hindawi.com]. 2016; [cited 2023, December 11]. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/ijfs/2016/2037029>.
3. Walde SG, Balaswamy K, Velu V. Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Food Engineering*. 2022; Vol.55. 271-276 p.
4. Bepalko VV, Buryak YuI. [The effect of pre-sowing seed treatment with a microwave field in combination with a growth regulator and a biological product on the sowing qualities and yield properties of spring barley]. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*. 2014; 4 (12). 133-138 p.
5. Kovalev AV, Spiridonov OB, Lysenko IE. Method and system of pre-sowing microwave treatment of agricultural crop seeds. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020; Vol.13. 3964-3969 p.
6. Vasilev AA, Vasilev AN, Budnikov DA. Dynamic arches destruction by a bulk material flow separator: a case study of the separator usage in microwave grain processing plants. [Internet]. *Agronomy*. 2022; Vol.12. 997 p. [cited 2023, December 11]. Available from: <https://www.mdpi.com/journal/agronomy>. doi: 10.3390/agronomy12050997.
7. Budnikov DA, Vasilev AN, Vasilv AA. Proektirovanie rabochikh zon ustanovok SVCh-konvektivnoy obrabotki zerna putem elektrodinamicheskogo modelirovaniya. [Design of working areas of microwave convective grain processing plants by electrodynamic modeling]. Orel: Kartush. 2022; 348 p.
8. Malakhov AN, Vendin SV. [Device and method for controlling microwave seed treatment on a conveyor belt]. *Agroinzheneriya*. 2021; 4 (104). 59-65 p. doi: 10.26897/2687-1149-2021-4-59-65.
9. Li ZY, Wang RF, Kudra T. Uniformity issue in microwave drying. *Drying Technology*. 2011; Vol.29. 6. 652-660 p.
10. Kolesnikov SM, Trefilov DN, Dementev AN. [Design and optimization of a strip emitter using the CST Microwave Studio package]. *Radiopromyshlennost'*. 2015; 4. 98-106 p.
11. Fateev AV. Application of CST Microwave Studio software for calculating microwave antennas and microwave devices. [Internet]. TUSUR University. Tomsk: TUSUR. 2017; 115 p. [cited 2023, December 11]. Available from: <https://edu.tusur.ru/publications/7145>.
12. Yanushkevich VF. Antenny i ustroystva SVCh. [Antennas and microwave devices]. Novopolotsk: PGU. 2009; 360 p.
13. Kuzmin KA, Morozov SM, Pavlov IV. [Estimation of the magnitude of the microwave power of the grouping device in a repeated magnetic field]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*. 2020; 6. 98-104 p. doi: 10.28983/asj.y2020i6pp98-104.
14. Chetverikov EA, Moiseev AP, Lyagina LA. [Improvement of methods of excitation of the electromagnetic field of the microwave range in drying plants of agricultural products of stationary type]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*. 2016; 6. 70-72 p.
15. Pimenov VYu, Volman VI, Muravtsov AD. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. [Technical electrodynamics]. Moscow: Radio i svyaz'. 2002; 536 p.
16. Isaev AV, Bastron AV, Yakhontova VS. [Investigation of the influence of the degree of uneven heating of rapeseed seeds in an ultrahigh frequency electromagnetic field on their germination energy and germination]. *Vestnik KrasGAU*. 2016; 4 (115). 131-137 p.
17. Kuzmin KA, Sokoreva EV. [In a tunable resonator of an energy harvesting system]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*. 2020; 1. 65-67 p. doi: 10.28983/asj.y2020i1pp65-67.
18. Petrov RV. [Investigation of a magnetoelectric slit resonator in the microwave range]. *Inzhenernaya fizika*. 2012; 1. 33-38 p.
19. Zavaliy AA, Volozhaninov SS, Volozhaninova NV. [Development of a slit microwave emitter for tillage of soil, seeds and plants]. *Innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii: Konferentsiya "ITNO 2022"*. Rostov-na-Donu: DGTU-PRINT. 2022; 69-74 p.
20. Ziganshin BG, Zhdankin MV, Belova MV. [Development and justification of the parameters of a microwave installation with a spherical resonator for heat treatment of slaughterhouse waste]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; Vol.12. 2 (44). 75-80 p. doi: 10.12737/article_59ad077c11ab76.96305845.

Authors:

Vasilev Aleksey Alekseevich – Ph.D. of Technical Sciences, leading researcher of the Laboratory of Electrophysical Effects on Biological Objects and Materials, e-mail: lex.of@mail.ru
Vasilev Aleksey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, chief researcher of the Laboratory of Electrophysical Effects on Biological Objects and Materials, e-mail: vasilev-viesh@inbox.ru
Budnikov Dmitriy Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, chief researcher of the Laboratory of Electrophysical Effects on Biological Objects and Materials, e-mail: dimm13@inbox.ru
Sobchenko Yuriy Aleksandrovich - Ph.D. of Technical Sciences, leading specialist of Bioenergy and Supercritical Technologies Laboratory, e-mail: yuri217@rambler.ru
Federal Scientific Agricultural Engineering Center "VIM", Moscow, Russia.