

Оценка эффективности использования сфокусированных методов в процессах микроволновой обработки зерновых культур.

О.В. Потапова¹, К.Н. Голикова²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева – КАИ

²Общество с ограниченной ответственностью «АЙ ДЖИ ЭФ – ИНЖИНИРИНГ»

Аннотация: Проведена оценка эффективности использования сфокусированных апертур в процессах микроволновой обработки зерна. Определена предельная глубина эффективной фокусировки, зависимости эффективности фокусировки и размера сфокусированной области от глубины расположения точки фокусировки.

Ключевые слова: Микроволновая обработка, сфокусированная апертура, эффективность фокусировки, размер области фокусировки.

Введение

В настоящее время микроволновые установки широко применяются в технологических процессах в промышленности и сельском хозяйстве. СВЧ-энергия, как высокопотенциальный источник тепла, используется в пищевой промышленности [1-4], сельском хозяйстве [5, 6], медицине [7-9]. Кроме того, перспективно использование нетеплового воздействия микроволнового излучения [10], а также его применение в диагностических целях [11, 12].

Использование электромагнитных полей сверхвысоких частот открывает новые возможности создания экологически чистых производств, при этом представляется возможным снизить энергозатраты, повысить производительность технологических линий, получить конечный продукт высокого качества.

Материалы, подвергающиеся воздействию при СВЧ-обработке, имеют достаточно высокие значения диэлектрических потерь, что обуславливает поглощение энергии электромагнитного поля и преобразование ее в тепловую энергию. Степень нагрева будет зависеть от параметров воздействующего поля и характеристик обрабатываемых материалов.

Зерновые культуры представляют собой диссипативные среды с комплексной абсолютной диэлектрической проницаемостью:

$$\epsilon'_a = \epsilon_a(1 - jtg\delta) = \epsilon_0\epsilon(1 - jtg\delta)$$

где $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ [Ф/м] – диэлектрическая проницаемость вакуума,

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь, определяющий степень поглощения энергии электромагнитного поля средой.

Диэлектрическая проницаемость зерновых культур зависит от многих факторов: частоты электромагнитного поля, влажности культуры, ее плотности, температуры материала и т.д. [13]. В качестве усредненных значений при исследованиях использовались следующие значения, соответствующие приблизительной влажности культуры 15%: $\epsilon = 2,6$, $tg\delta = 0,1$, полученные из [13].

Распределение электромагнитного поля в поглощающей среде характеризуется значительным затуханием при распространении, которое увеличивается при росте $tg\delta$ материала. Таким образом, при обработке зерновых культур, наблюдается существенное уменьшение интенсивности электромагнитного поля в глубину материала [14-16]. Преодолеть этот эффект возможно, осуществив фокусировку электромагнитного поля на определенную глубину.

Сфокусированное возбуждение позволяет сконцентрировать распределение напряженности поля вблизи точки фокусировки в плоскостях параллельной и перпендикулярной апертуре, тогда как синфазное возбуждение создает достаточно равномерное распределение напряженности поля в плоскости, параллельной апертуре и существенно затухающее распределение в перпендикулярной плоскости (рис. 1).

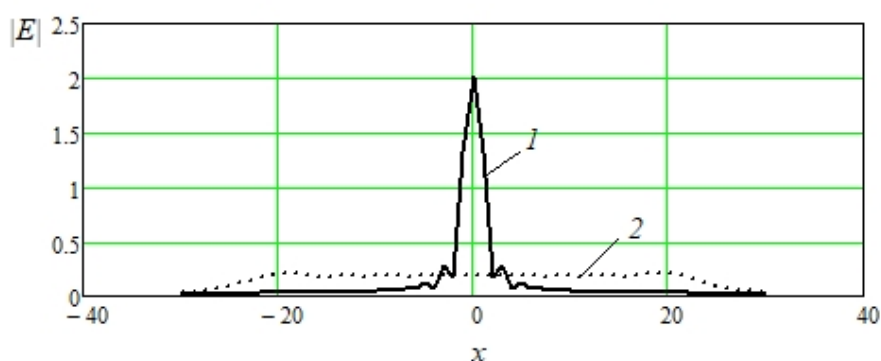


Рис.1. – Сфокусированное (1) и синфазное (2) распределение электромагнитного поля в плоскости, параллельной антенне (глубина точки фокусировки $zf=15$ мм)

Используемая модель

Для оценки эффектов, достигаемых при фокусировке электромагнитного поля в область при СВЧ обработке зерновых культур, в качестве упрощенной модели рассматривалась полубесконечная среда с усредненными параметрами зерновой культуры (указанными выше), в которой располагался плоский излучатель (рис. 2).

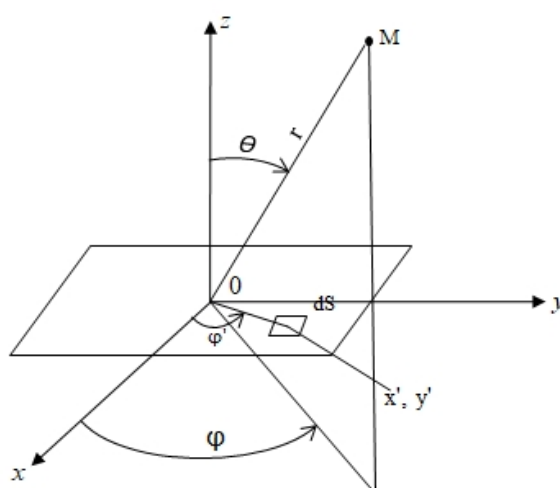


Рис.2. – Упрощенная модель, используемая при исследовании

Достоверность данной модели для оценки эффектов от использования сфокусированных апертур показана в [16]. Фокусировку в точку с

координатами (x_0, y_0, z_0) , достигалась выбором фазового распределения в излучателе:

$$\varphi(x', y') = \beta \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2 + z_0^2} \quad (1)$$

где β - коэффициент фазы в среде,

(x', y') – координаты элементарного излучателя, расположенного на апертуре.

Элементарный излучатель предполагался изотропным, что позволяет получить достоверные оценки распределения сфокусированного поля [17]. Напряженность поля в точке наблюдения, расположенной на расстояниях, соизмеримых с размерами апертуры, определялась следующим образом:

$$E(x, y, z) = \int_{-L}^L \int_{-L}^L \frac{I(x', y') e^{j\varphi(x', y')} e^{-\alpha \sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + z^2}}}{\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + z^2}} \quad (2)$$

где $I(x', y')$ – амплитудное распределение в излучателе (предполагалось равномерным);

$\varphi(x', y')$ – фазовое распределение в излучателе, соответствовало условию фокусировки (1);

α – коэффициент затухания среды, β - коэффициент фазы;

(x, y, z) – координаты точки наблюдения.

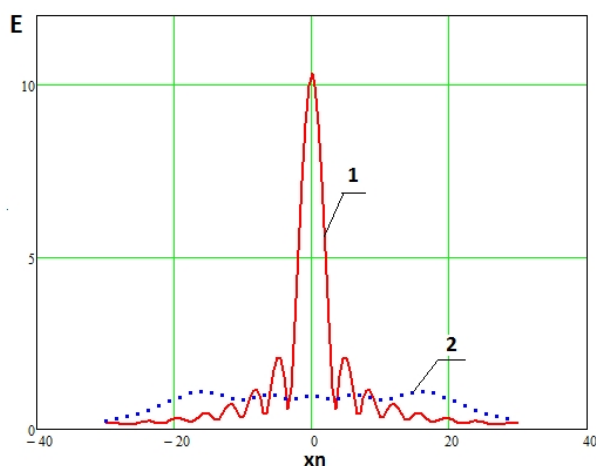
Указанные усредненные параметры зерновой культуры $\varepsilon = 2,6$, $\text{tg} \delta = 0,1$, соответствуют значениям коэффициента затухания и коэффициента фазы, соответственно, $\alpha = 70 \frac{\text{Нп}}{\text{м}}$, $\beta = 1400 \text{ рад/м}$ при частоте электромагнитного поля 42 ГГц. Излучатель был выбран квадратной формы размером 50×50 мм.

Полученные результаты

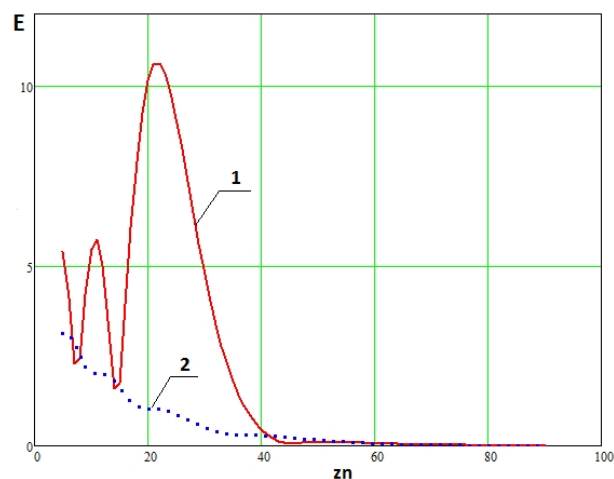
На рис. 3 представлены распределения напряженности электромагнитного поля в плоскостях, параллельной и перпендикулярной

апертуре, при различных глубинах фокусировки. Из этих рисунков следует, что, перемещая точку фокусировки в глубину материала, мы изменяем расположение точки с максимальным значением напряженности электрического поля. Однако, при увеличении глубины точки фокусировки, положение точки с максимальным значением напряженности электрического поля все сильнее отличается от величины z_f в сторону меньших значений.

Эффект от использования фокусировки в плоскости, перпендикулярной апертуре, сохраняется определенной глубины (при указанных выше параметрах зерна до глубины 50 мм, что соответствует значению $z_f=80$ мм). При больших значениях z_f распределения напряженности поля при сфокусированном и синфазном возбуждении апертуры становятся сходными.

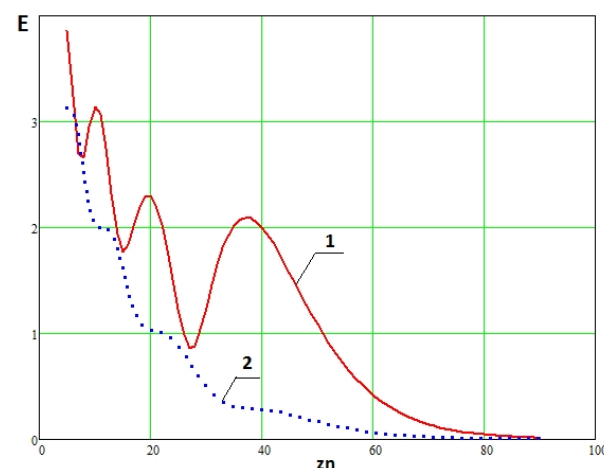
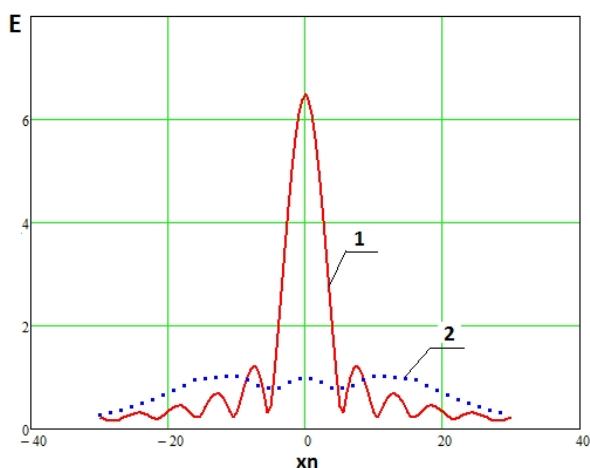


а) плоскость, параллельная апертуре



б) плоскость, перпендикулярная апертуре

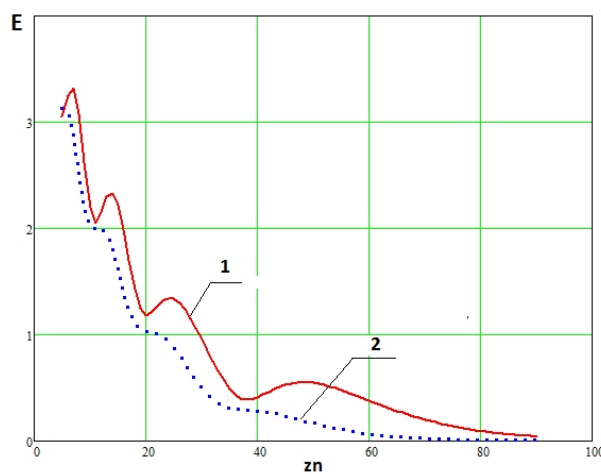
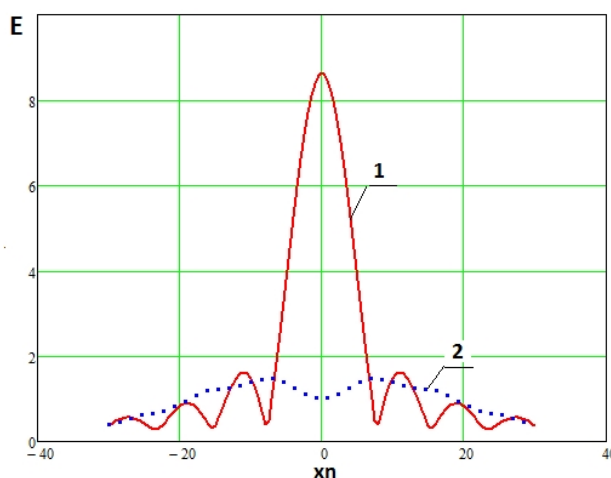
$z_f=25$ мм



в) плоскость, параллельная апертуре

г) плоскость, перпендикулярная апертуре

$z_f=50\text{мм}$



д) плоскость, параллельная апертуре

е) плоскость, перпендикулярная апертуре

$z_f=80\text{мм}$

Рис. 3. –Распределения напряженности электромагнитного поля при сфокусированном (кривая 1) и синфазном (кривая 2) возбуждении апертуры

Из рис. 3 следует, что эффективность сфокусированного возбуждения и размер области фокусировки изменяются при изменении глубины точки фокусировки. В качестве количественной оценки эффективности сфокусированного возбуждения будем рассматривать превышение напряженности сфокусированного электрического поля в точке с ее максимальным значением к аналогичному значению при синфазном возбуждении апертуры:

$$E = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{мин}}} \quad (3)$$

Областью фокусировки будем считать объем, в пределах которого напряженность электрического поля при сфокусированном возбуждении превышает значения напряженности при синфазном возбуждении:

$$V_{\text{фок}} = L_x \cdot L_y \cdot L_z,$$

где L_{xz} , L_{yz} , L_z – линейные размеры сфокусированной области по соответствующим осям.

На рис. 4, 5 представлены зависимости изменения эффективности фокусировки и размера области фокусировки от глубины расположения точки фокусировки соответственно. Использование сфокусированного возбуждения апертуры увеличивает напряженность электрического поля в точке фокусировки от 12 до 3 раз, причем с увеличением глубины расположения точки фокусировки эффективность уменьшается. Уменьшение эффективности сфокусированного возбуждения сопровождается увеличением объема области фокусировки.

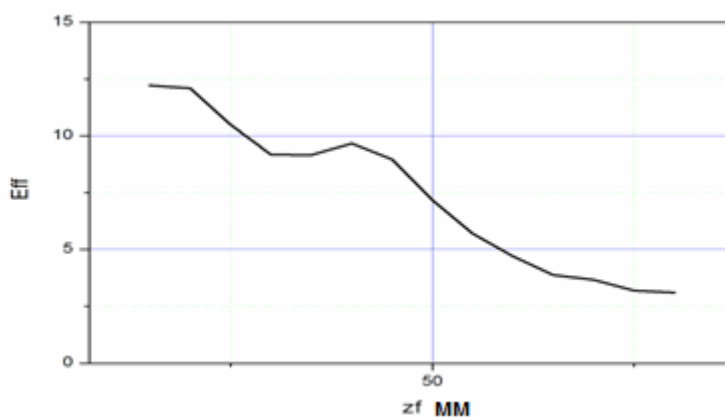


Рис. 4. – Зависимость эффективности фокусировки от глубины расположения точки фокусировки

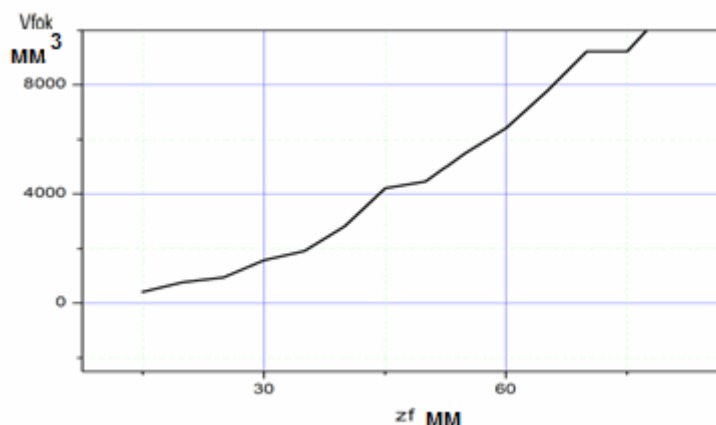


Рис. 5. – Зависимость размера области фокусировки от

глубины расположения точки фокусировки

Сфокусированное возбуждение апертуры позволяет управлять положением точки фокусировки и в плоскости, параллельной апертуре. Пространственные картины распределения сфокусированного поля при различных положениях точки фокусировки в плоскости, проходящей через точку фокусировки при $z_f=50\text{мм}$, представлены на рис. 6.

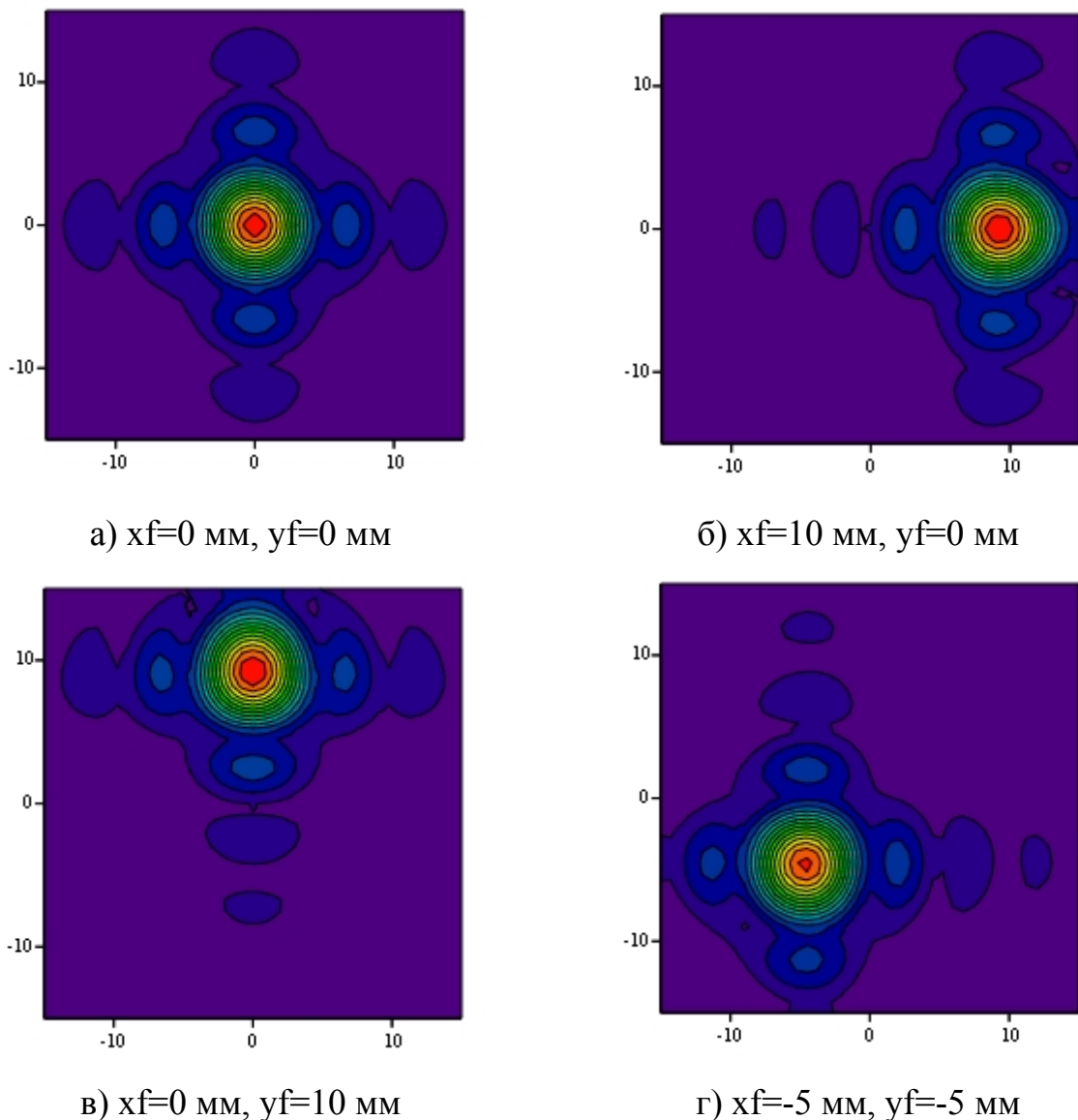


Рис. 6. – Смещение точки фокусировки в плоскости, параллельной апертуре

Смещение точки фокусировки относительно центра апертуры приводит к снижению эффективности фокусировки (рис. 7) и увеличению размера сфокусированной области (рис. 8). Из представленных рисунков следует, что величина снижения эффективности фокусировки будет зависеть от глубины расположения точки фокусировки. Необходимо отметить, что увеличение размера сфокусированной области происходит за счет ее увеличения в плоскости, параллельной апертуре (рис. 9а). В перпендикулярной плоскости размер области фокусировки практически не зависит от смещения точки фокусировки относительно центра апертуры (рис. 9б). Кроме этого, поскольку в работе рассматривалась апертура квадратной формы, описываемые изменения инварианты по отношению к смещению точки фокусировки вдоль осей X и Y .

Заключение

Использование плоских сфокусированных апертур в процессах обработки зерна позволяет значительно увеличить интенсивность электромагнитного поля вблизи точки фокусировки по сравнению с синфазным возбуждением. Возможность формировать максимумы интенсивности электромагнитного поля на определенной глубине в диссипативной среде является несомненным и важным достоинством сфокусированного возбуждения.

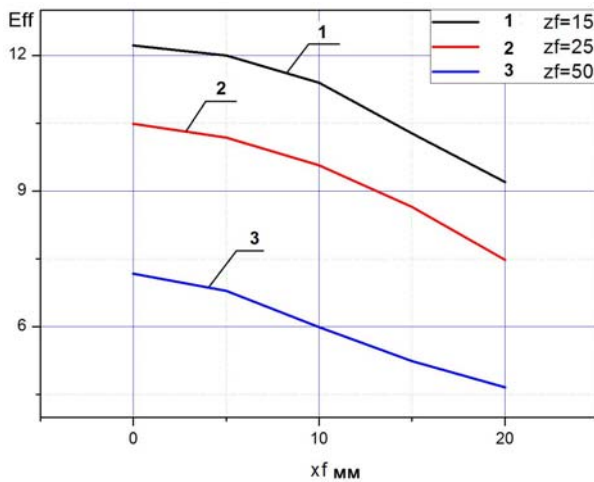


Рис. 7

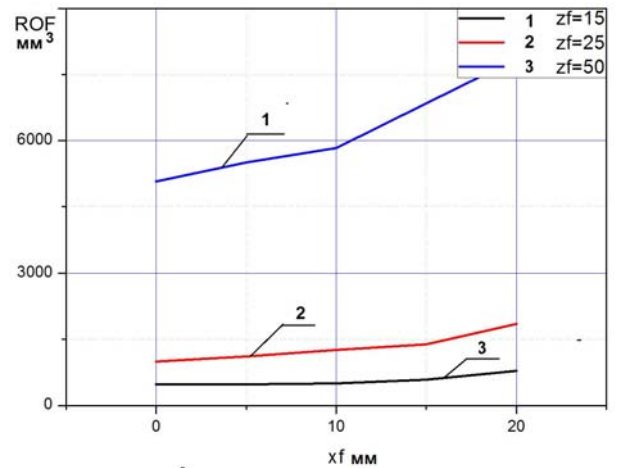
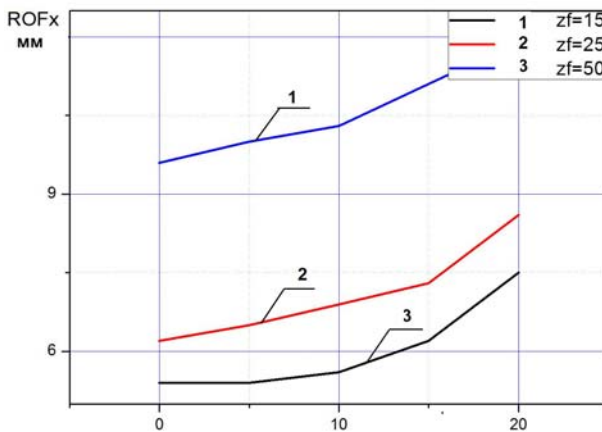
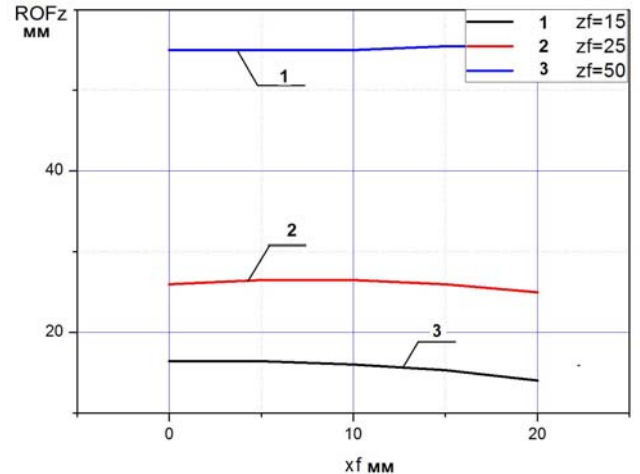


Рис. 8



а) плоскость, параллельная апертуре



б) плоскость, перпендикулярная апертуре

Рис. 9. Изменение РОФ

Однако наличие значительного затухания в среде ограничивает глубину эффективного использования этого метода небольшими значениями глубины точки фокусировки. Так, в представленной работе, при влажности зерна около 15% эффективная глубина не превышает 50 мм.

Кроме того, прямым следствием увеличения интенсивности электромагнитного поля вблизи точки фокусировки является небольшой

размер сфокусированной области, что может ограничить применение сфокусированных апертур в процессах, требующих обеспечивать равномерность микроволновой обработки. В качестве практических рекомендаций для подобных применений авторы предлагают работать на глубинах, близким к предельным значениям, и использовать перемещение точки фокусировки в плоскости, параллельной апертуре, и (или) перемещение зерна в процессе обработки.

Литература

1. Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов.— М.: Агропромиздат, 1986. 351 с.
 2. Каданер Я.Д. Применение микроволнового нагрева в кулинарии (обзор).— М.: НИИОП, вып.2, 1969. 54 с.
 3. Lentz C.P. Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels and use // Food Technol., 15.—1961. pp. 243-247.
 4. СВЧ энергетика, т.2 "Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности"/ под ред. Окресса Э.— М.: Мир, 1971. 271 с.
 5. Бородин И.Ф., Шарков Г.А., Горин А.Д. Применение СВЧ- энергии в сельском хозяйстве.— М.: ВНИИТЭИ агропром, 1987. 56 с.
 6. Применение энергии высоких и сверхвысоких частот в технологических процессах сельскохозяйственного производства // Сборник научных трудов.— Челябинск: ЧИМЭСХ, 1983. 142 с.
 7. СВЧ энергетика, т.3 "Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике"/ под ред. Окресса Э.— М.: Мир, 1971. 248 с.
 8. Starodub E., Shostac S., Martinyuk L. Some aspects of the use of laser therapy and electromagnetic radiation of ultra-high frequencies in the combined treatment of chronic pyelonephritis // Proceedings 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. — Kiev, Ukraine, 1995. pp. 124-130.
-

9. Makarenko B.I., Lysenko N.A., Tsutsaeva A.A., Beznosenko B.I. Results of the experimental study of the therapeutic effect of microwave radiation // Proceedings 5-th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology.—Kiev, Ukraine, 1995. pp.151-156.
 10. Файтенберг- Бланк В.Р. Итоги и перспективы изучения действия физических стимуляторов на молекулярном и клеточном уровнях // Сборник научных трудов "Влияние физических стимуляторов на организм и продуктивность сельскохозяйственных животных и птицы". — Одесса, ОСХИ, 1975. 274 с.
 11. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 1981, т. 24, №9, с. 1054-1061.
 12. Кубланов В.С., Потапова О.В., Седельников Ю.Е., Сысков А.М. Совершенствование характеристик СВЧ- радиотермографов в медицинских задачах / Материалы V Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» 2011, с. 241 – 245.
 13. Цымбал А.А., Будников Д.А. Диэлектрические свойства зерновых // Вестник ВНИИМЖ №4(24), 2016, с. 52-55.
 14. Седельников Ю.Е., Тестоедов Н.А., Веденькин Д.А., Данилов И.Ю., Потапова О.В., Романов А.Г., Фадеева Л.Ю., Чони Ю.И. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения / Под ред. Седельникова Ю.Е., Тестоедова Н.А. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2015. 308 с.
 15. Будников Д.А. Исследование распределения напряженности СВЧ поля в зерновом слое // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3234
 16. Васильев А.Н., Будников Д.А., Васильев А.А., Попов Б.А. Зависимость скорости сушки зерна от распределения и параметров воздуха в СВЧ-
-



конвективной зоне // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL:
ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_145_Vasilyev_Budnikov.pdf_d1bddb190b.pdf

17. Потапова О.В. Исследование методов сфокусированной апертуры для повышения эффективности СВЧ- технологических установок открытого типа: Автореф. дисс. канд. техн. наук. –Казань, 1988. 18 с.

References

1. Rogov I.A., Nekrutman S.V. Sverhvysochastotnyi nagrev pishevyih produktov [Microwave heating of foodstuff]. Moscow: Agropromizdat, 1986. 351 p.
2. KadanerYa.D. Primenenie microvolnovogo nagreva v kulinarii (obzor) [Application of microwave heating in cooking]. Moscow: NIIOP, vip.2, 1969. 54 p.
3. Lentz C.P. Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels and use. Food Technol., 15, 1961. pp. 243-247.
4. SVCH-energetika, t.2 "Primenenie energii cverhvyisokih chastot v promyshlennosti" ["Application of microwave energy in industry"]. Pod red. Okressa E. Moscow: Mir, 1971. 271 p.
5. Borodin I.F., Aharkov G.A., Gorin A.D. Primenenie SVCH energii v sel'skomhozyastve [Microwave applications in agriculture]. Moscow: VNIITEI agroprom, 1987. 56 p.
6. Primenenie energii cverhvyisokih chastot v tehnologicheskikh processah sel'skohozyastvennogo proizvodstva [Application of microwave energy in technological processes of agricultural production]. Sbornik nauchnyh trudov. Tchelyabinsk: CHIMESH, 1983. 142 p.
7. SVCH-energetika, t.3 "Primenenie energii cverhvyisokih chastot v medicine, nauke i tehnike" ["Application of microwave energy in medicine, science and technology "]. Pod red. Okressa E., Moscow: Mir, 1971. 248 p.

8. Starodub E., Shostac S., Martinyuk L. Proceedings 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. Kiev, Ukraine, 1995. pp. 124-130.
 9. Makarenko B.I., Lysenko N.A., Tsutsaeva A.A., Beznosenko B.I. Results of the experimental study of the therapeutic effect of microwave radiation. Proceedings 5-th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. Kiev, Ukraine, 1995. pp.151-156.
 10. Faitenberg-Blank V.R. Itogi I perspektivy izucheniya deistviya fizicheskikh stimulyatorov na molekulyarnom I kletochnom urovnyah. Sbornik nauchnykh trudov "Vliyanie fizicheskikh stimulyatorov na organism I produktivnost' sel'skohozyastvennykh givotnykh I ptitsyi. Odessa, OSHI, 1975. 274 p.
 11. Troitskiyi V.S. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniyi. Radiofizika, 1981. t.24, № 9, pp. 1054-1061.
 12. Kublanov V.S., Potapova O.V., Sedelnikov Yu.E., Syiskov A.M. Sovershenstvovanie harakteristik SVCH-radiotermorafov v medicinskih zadachah. Materialyi V vserossiiskoyi konferentsii "Radiolokacia I svyaz" 2011 (Proc. V Russian conference "Radar-location and communication"), pp. 241 - 245.
 13. Tsyimbal A.A., Budnikov D.A. Dielektricheskie svoystva zernovyih [Dielectric properties of grain crops]. Vestnik VNIIMG №4 (24), 2016, pp. 52-55.
 14. Sedel'nikov YU.E., Testoedov N.A., Veden'kin D.A., Danilov I.YU., Potapova O.V., Romanov A.G., Fadeeva L.YU., CHoni YU.I. Antennyi, sfokusirovannyye v zone blignego izluchennogo polya. Osnovyi teorii i tehnicheskie prilogeniya [Antennas, focusing in near radiation zone. Basic theory and technical applications]. Pod red. Sedelnikova Yu. E., Testoedova N.A. Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosmich. un-t, 2015, 308 c.
 15. Budnikov D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3234.
-



16. Vasil'ev A.N., Budnikov D.A., Vasil'ev A.A., Popov B.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 4 URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_145_Vasilyev_Budnikov.pdf_d1bddb190b.pdf).

17. Potapova O.V. Issledovanie metodov sfokusirovannoi apertury dlya povysheniya effektivnosti SVCH-technologicheskikh ustanovok otkryitogo tipa [Study of focusing aperture methods for increasing of efficiently of microwave process units of open type]: Avtoref. diss. kand. tech. nauk. Kazan, 1988. 18 p.