

УДК 631.171

**ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СВЧ ОБРАБОТКИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ**

Вендин Сергей Владимирович

Доктор технических наук, профессор

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина

п. Майский, Белгородская область, Россия

e-mail: elapk@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы выбора эффективной частоты источника электромагнитного излучения для СВЧ обработки технологической среды с диэлектрическими потерями.

Ключевые слова: электромагнитное поле, СВЧ, глубина проникновения, коэффициент ослабления, диэлектрические потери.

Технологическая СВЧ обработка (микроволновый нагрев) различных сред часто связана с обработкой неоднородной среды или среды с дисперсными включениями (семена сорных растений или вредителей в почве, насекомые в зерновой среде и др.) [1-7 и др.]. Поэтому при прогнозировании эффективности СВЧ обработки весьма важно определить условия, влияющие на характер распределения напряженностей электромагнитных полей.

В средах с диэлектрическими потерями принято считать, что ослабление амплитуды электромагнитной волны пропорционально коэффициенту ослабления α . В то же время отражение и преломление электромагнитных волн на границе раздела сред рассматриваются отдельно от контекста эффективности технологической обработки среды.

Ниже приведены результаты теоретических исследований относительно выбора эффективной частоты источника электромагнитного излучения для СВЧ обработки технологической среды с диэлектрическими потерями, отдельные результаты которых имеются в работах [8-10].

Если предположить, что размеры включений в сплошной среде будут намного меньше длины волны излучаемой источником, то эту среду можно рассматривать как однородную с усредненными параметрами. Тогда при технологической электромагнитной обработке полубесконечной или плоскостной среды на первом этапе следует рассмотреть распространение электромагнитной волны при переходе из одной среды (воздуха) в обрабатываемую среду, т.е. из среды «0» в среду «I», как показано на рисунке 1. Эта задача является классической, решение ее можно встретить в различной литературе [9-10]. Для упрощения электромагнитную волну будем полагать монохроматической, плоской и линейно-поляризованной, которая падает перпендикулярно поверхности среды.

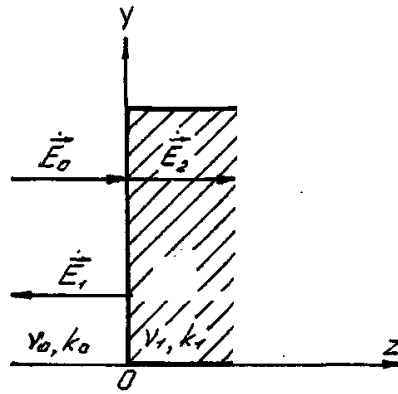


Рисунок 1 – Расчетная схема распространения ЭМВ

В наших обозначениях по рисунку 1 будем считать, что электрический вектор \vec{E} поляризован вдоль оси «у», а ЭМВ распространяется вдоль оси «z».

Из теории переменного электромагнитного поля известно, что напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей взаимосвязаны между собой и образуют взаимно перпендикулярные векторы. Поэтому при анализе часто используют введение комплексного электромагнитного вектора \vec{M} связывающего электрическое и магнитное поле в соответствии с равенством [9-10]:

$$\vec{M} = \vec{H} \pm i\nu\vec{E}, \quad (1)$$

где ν - характеристическая проводимость среды:

$$\nu = [(\varepsilon\omega - i\sigma)/\mu\omega]^{1/2}; \quad (2)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды; σ - электрическая проводимость среды; μ - магнитная проницаемость среды; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота ЭМВ; f - частота ЭМВ.

При этом комплексный электромагнитный вектор \vec{M} должен удовлетворять равенствам:

$$\text{rot}\vec{M} = \pm k\vec{M}; \quad (3)$$

$$\text{div}\vec{M} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial\vec{M}}{\partial x} = \frac{\partial\vec{M}}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

где $k = \mu\omega\nu$ - коэффициент распространения ЭМВ.

Уравнение (3) с учетом (4), (5) и оператора Лапласа ∇^2 преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 \vec{M}}{\partial x^2} + k^2 \vec{M} = 0 \quad (6)$$

Решениями уравнения (6) для напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в каждом слое в соответствии с рисунком 1 являются функции вида:

при $-\infty < z \leq 0$

$$\dot{E}_{y0} = \dot{E}_0 e^{ik_0 z} + \dot{E}_1 e^{-ik_0 z}; \quad (7)$$

$$\dot{H}_{x0} = -v_0 [\dot{E}_0 e^{ik_0 z} - \dot{E}_2 e^{-ik_0 z}]; \quad (8)$$

при $0 \leq z < \infty$

$$\dot{E}_{y1} = \dot{E}_2 e^{ik_1 z}; \quad (9)$$

$$\dot{H}_{x1} = -v_1 [\dot{E}_2 e^{ik_1 z}], \quad (10)$$

где \dot{E}_0 , \dot{E}_1 , \dot{E}_2 – соответственно модули комплексных напряженностей электрического поля падающей, отраженной и прошедшей в среду ЭМВ.

Индексы «x», «y» указывают вдоль какой оси поляризован вектор напряженности поля. Знак (-) в выражении для \dot{H}_x указывают на то, что при такой поляризации ЭМВ вектор \vec{H} направлен в сторону, противоположную оси x. Коэффициенты при функции e^{ikz} соответствуют падающей ЭМВ, а коэффициенты при функциях e^{-ikz} соответствуют отраженной ЭМВ.

С учетом непрерывности касательных составляющих напряженностей \vec{E} и \vec{H} значения \dot{E}_1 и \dot{E}_2 однозначно определяются через комплексную напряженность падающей ЭМВ \dot{E}_0 :

$$\dot{E}_1 = -\dot{E}_0 \frac{v_1 - v_0}{v_1 + v_0}; \quad (11)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_0 \frac{2v_0}{v_1 + v_0}. \quad (12)$$

Окончательно выражения для \dot{E}_{y1} и \dot{H}_{x1} имеют вид:

$$\dot{E}_{y1} = \dot{E}_0 \frac{2v_0}{v_1 + v_0} e^{ik_1 z}; \quad (13)$$

$$\dot{H}_{x1} = -\dot{E}_0 \frac{2\nu_0\nu_1}{\nu_1+\nu_0} e^{ik_1z}. \quad (14)$$

Коэффициент распространения k может быть представлен в виде комплексного числа $k = \beta + i\alpha$. Тогда с учетом равенства $k = \mu\omega\nu$ аппроксимации на сверхвысоких частотах по формулам [9-10]:

$$k = \beta + i\alpha; \quad (15)$$

$$\beta \approx 2\pi\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda; \quad (16)$$

$$\alpha \approx 188,4\sigma/\sqrt{\varepsilon_r}, \quad (17)$$

где λ - длина ЭМВ в вакууме, м,

Выражение для расчета напряженности электрического поля в глубине среды имеет вид:

$$\dot{E}_{y1} = \dot{E}_0 \Psi(\lambda) e^{-\alpha_1 z} e^{i\beta_1 z}, \quad (18)$$

где $\Psi(\lambda)$ – комплексная функция зависящая от длины ЭМВ:

$$\Psi(\lambda) = K(\lambda) e^{-i\varphi(\lambda)}, \quad (19)$$

где $K(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ – соответственно функции амплитуды и фазы.

С учетом электрофизических характеристик воздуха ($\varepsilon_{r0} = 1, \sigma_0 = 0, \mu_{r0} = 1$) для $K(\lambda)$ и $\varphi(\lambda)$ имеем расчетные формулы:

$$K(\lambda) = 2/\sqrt{(1 + \sqrt{\varepsilon_{r1}})^2 + (30\lambda\sigma_1/\sqrt{\varepsilon_{r1}})^2}; \quad (20)$$

$$\varphi(\lambda) = \text{arctg}[30\lambda\sigma_1/((1 + \sqrt{\varepsilon_{r1}})\sqrt{\varepsilon_{r1}})]. \quad (21)$$

Окончательно для \dot{E}_{y1} можем записать

$$\dot{E}_{y1} = \dot{E}_0 K(\lambda) e^{-\alpha_1 z} e^{i[\beta_1 - \varphi(\lambda)]z}. \quad (22)$$

Выражение (22) показывает, что напряженность электрического поля в глубине среды зависит не только от электрофизических параметров, но и от длины электромагнитной волны λ . При этом имеет место фазовый сдвиг излучаемой волны $\varphi(\lambda)$.

Напряженность электрического поля на глубине $z = d$ будет равна

$$\dot{E}_{y1}(d) = \dot{E}_0 K(\lambda) e^{-\alpha_1 d} e^{i[\beta_1 - \varphi(\lambda)]d}, \quad (23)$$

$$\dot{E}_{y1}(d) = |\dot{E}_{y1}(d)| e^{i[\beta_1 - \varphi(\lambda)]d}, \quad (24)$$

где $|\dot{E}_{y1}(d)|$ - модуль напряженности электрического поля на глубине $z = d$:

$$|\dot{E}_{y1}(d)| = \dot{E}_0 K(\lambda) e^{-\alpha_1 d} . \quad (25)$$

С практической точки зрения полезно исследовать поведение функции (25) в зависимости от электрофизических параметров и длины волны. Для этого разделим $|\dot{E}_{y1}(d)|$ на \dot{E}_0 в результате получим функцию передачи электромагнитной волны на глубину $e_{y1}(d)$ в относительных единицах:

$$e_{y1}(d) = K(\lambda) e^{-\alpha_1 d} . \quad (26)$$

Заметим также, что при выборе частоты СВЧ источника для технологической СВЧ обработки среды на определенной глубине необходимо учитывать не только ослабление амплитуды, но и изменение уровня мощности в зависимости от длины волны.

Мощности передаваемые на глубину $z=d$ на различных частотах f_1 и f_2 определяются выражениями:

$$P_1(d) = 2\pi \varepsilon_{r1} \varepsilon_0 t g \delta_1 f_1 |E_1(d)|^2 ; \quad (27)$$

$$P_2(d) = 2\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 t g \delta_2 f_2 |E_2(d)|^2 , \quad (28)$$

где f_1 и f_2 – частота ЭМВ; $P_1(d)$, $P_2(d)$ – мощности на глубине $z=d$ соответственно на частотах f_1 и f_2 ; ε_{r1} , ε_{r2} , $t g \delta_1$, $t g \delta_2$ – соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь среды на частотах f_1 и f_2 ; ε_0 – диэлектрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$); $|E_1(d)|^2$, $|E_2(d)|^2$ – значение квадрата модуля напряженности электрического поля на частотах f_1 и f_2 .

Поэтому введем относительный коэффициент эффективности СВЧ мощности передаваемой на глубину $z=d$ на разных частотах $\beta_{\text{эф}}(d)$ равный отношению мощностей на различных частотах f_1 и f_2 :

$$\beta_{\text{эф}}(d) = \frac{P_2(d)}{P_1(d)} = \frac{2\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 t g \delta_2 f_2 |E_2(d)|^2}{2\pi \varepsilon_{r1} \varepsilon_0 t g \delta_1 f_1 |E_1(d)|^2} , \quad (29)$$

или с учетом (26):

$$\beta_{\text{эф}}(d) = \frac{\varepsilon_{r2} t g \delta_2 f_2 \left(\frac{K(\lambda_2)}{K(\lambda_1)}\right)^2}{\varepsilon_{r1} t g \delta_1 f_1} e^{-2(\alpha_2 - \alpha_1)d} , \quad (30)$$

где $K(\lambda_1)$, $K(\lambda_2)$ - значение функции передачи электромагнитной волны на глубину $z=d$ при различных длинах волн соответственно на частотах f_1 и f_2 ; α_1 , α_2 - коэффициент ослабления электромагнитной волны на частотах f_1 и f_2 .

Список литературы

1. Бородин, И.Ф. Применение СВЧ энергии в сельском хозяйстве [Текст] / И.Ф. Бородин, Г.А. Шарков, А.Д. Горин.- М.: ВНИИТЭИагропром. 1987.- 55 с.
2. Андреев, С.А. Установка для СВЧ-обработки семян [Текст] / С.А. Андреев. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- М., 1987,- 16 с.
3. Вендин, С.В. Высоочастотный нагрев в технологии обработки семян зерновых [Текст] / С.В. Вендин // Техника в сельском хозяйстве. 1994. № 3. С. 18.
4. Вендин, С.В. Воздействие температурных факторов на всхожесть семян зерновых при их обработке в электромагнитном поле СВЧ [Текст] / С.В. Вендин, А.Д. Горин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1994.- № 3. С. 21.
5. Вендин, С.В. Интегральная оценка температурного действия на семена [Текст] / С.В. Вендин // Техника в сельском хозяйстве. 1995. № 3. С. 31.
6. Вендин, С.В. Результаты экспериментальных исследований по предпосевной обработке семян пшеницы электромагнитным полем [Текст] / С.В. Вендин // Инновации в АПК.- 2016. № 1(16). С. 73-77.
7. Вендин, С.В. Экспериментальные исследования процессов СВЧ обработки семян [Текст] / С.В. Вендин // Монография.- Москва-Белгород: ООО «ЦКБ «БИБКОМ».- 2017.-116 с.
8. Вендин, С.В. Технологические приемы СВЧ - обработки семян в слое [Текст] / С.В. Вендин // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2016. – № 2(10). – С. 3-11.
9. Вендин, С.В. К расчету напряженностей электромагнитного поля при СВЧ обработке диэлектрических плоскострых объектов [Текст] / С.В. Вендин // Вестник Белгородского государственного технологического

университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 215-218.

10. Вендин, С.В. Теория и математические методы анализа электродинамики процессов СВЧ обработки семян [Текст] /С.В. Вендин.- М.: ОАО «Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», ООО «ТРАНСЛОГ», 2015. 137 с. ISBN-online 978-5-905563-38-6.

**SELECTING THE EFFECTIVE FREQUENCY FOR MICROWAVE
PROCESSING OF A TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT WITH A
DIELECTRIC LOSS**

Vendin Sergey Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorina

Maysky village, Belgorod region, Russia

e-mail: elapk@mail.ru

Annotation: The article considers the issues of choosing the effective frequency of an electromagnetic radiation source for microwave processing of a process medium with dielectric losses.

Key words: electromagnetic field, microwave, penetration depth, attenuation coefficient, dielectric loss.