

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

Введение

Использование СВЧ-энергии для сушки древесины эффективнее, чем ВЧ-энергии, так как мощность, передаваемая диэлектрику электромагнитным полем, пропорциональна частоте, квадрату напряженности электрического поля и коэффициенту диэлектрических потерь. В России для промышленного использования отведены диапазоны микроволн со следующими значениями частот: 460, 915 и 2450 МГц. Выбор частот определяется характеристиками материала, подлежащего сушке. Поглощение и преобразование в тепло СВЧ-мощности в диэлектрическом материале с потерями рассчитывается в зависимости от комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь. Влажная древесина имеет наибольшую величину коэффициента диэлектрических потерь. При использовании СВЧ-энергии для сушки пиломатериалов следует принять во внимание ряд преимуществ, присущих только данному виду энергии:

- возможность сконцентрировать на единице объема древесины высокую тепловую мощность, что невозможно при традиционных способах сушки;
- возможность получить избирательный нагрев древесины и нужное по технологии распределение температур в материале при малой инерционности процесса.

Однако ряд причин приводят к неудовлетворительным результатам использования СВЧ-энергии для сушки древесных материалов. К ним следует отнести:

- маломощные источники СВЧ, работающие на частотах 2450 МГц, что неприемлемо для сушки пакета пиломатериалов;
- одностороннее облучение пакета, что приводит к неравномерному по его ширине нагреву и сушке;
- локальные перегревы материала вследствие образования поверхностных волн, приводящих к возгоранию древесины;
- неравномерное распределение СВЧ-энергии по штабелю пиломатериалов.

В работе [1] рассмотрена электродинамическая модель процесса сушки древесины в сушильной камере, где СВЧ нагрев обеспечивается волноводно-щелевыми облучателями, расположенными вдоль камеры, т.е. параллельно штабелю древесины. Однако, несмотря на физически строгую постановку задачи, использование специализированной программы компьютерного моделирования и экспериментальное подтверждение полученных результатов четких рекомендаций для разработчиков и обсуживающего персонала подобных технологических установок в полной мере получить все же не удастся.

В настоящей работе авторы попытались рассмотреть задачи, решение которых способствовало бы улучшению существующих электродинамических моделей, и попытаться найти конкретный алгоритм автоматизированного проектирования СВЧ-камер сушки.

Постановка задачи

Моделированию волноводно-щелевых излучателей посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований, которые включают в себя анализ физических особенностей излучения наклонных и криволинейных щелей в ближней и промежуточной зоне, исследование особенностей поляризационных и дифракционных эффектов излучения и взаимного влияния излучателей.

Рассмотрим постановку задачи, близкую к [1], соответствующую расположению волноводного тракта в сушильной установке с бегущей волной – сушилки конвейерного типа с пе-

рекрестным движением, в которой направление движения материала и поток электромагнитного поля перпендикулярны друг другу (рис.1).

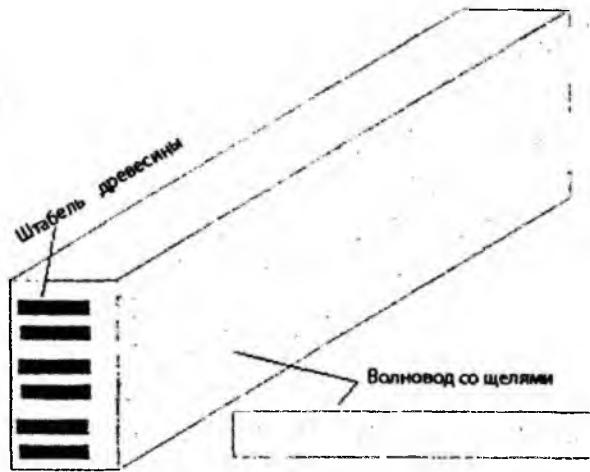


Рис. 1

Волноводно-щелевые облучатели расположены вдоль штабеля, т.е. излучение каждой щели направлено перпендикулярно торцевой поверхности досок. Длина каждой щели принималась равной $0,5\lambda$. Подобная излучающая система образует двумерную эквидистантную антенную решетку, возбужденную равномерно и синфазно. Известно, что металлическая плоскость, вдоль которой расположена щель, является бесконечной плоскостью, то диаграмма направленности такой щели идентична диаграмме направленности проволочного вибратора.

Известно, что для проволочного вибратора существует строгое решение внешней электродинамической задачи, определяющей значение компонент электромагнитного поля на любом расстоянии от излучателя. При совпадении плоскостей введенной в щель доски и вектора напряженности электрического поля E интенсивность облучения доски СВЧ-энергией максимальна. При движении доски через волновод каждый ее участок получает одинаковую порцию энергии. Если по ходу движения доски установить несколько волноводов, то с интервалом времени каждый участок доски получит одинаковую порцию энергии. В такой установке реализуется прерывистый или циклический процесс сушки, который менее энергоемкий, чем непрерывный.

В электродинамической модели, которая представлена на рис.1, расстояние между каждой щелью до штабеля соответствовало дальней зоне одиночного излучателя. Однако применительно к волноводу с 10 прорезанными щелями штабель находится в ближней зоне, поскольку для подобной системы, которая образует антенную решетку, расстояние дальней зоны хорошо описывается соотношением $R_{дз} > 2L^2/2$. В работе [1] мощность рассчитывалась по соотношениям, которые приемлемы для дальней зоны одиночного щелевого излучателя.

Согласно нашим исследованиям, в которых мощность электромагнитного поля линейной антенной решетки рассчитывалась по теореме Пойтинга для комплексных амплитуд по соотношению

$$S = [E, H], \quad (1)$$

приводит к существенным отличиям в пространственном распределении микроволновой мощности по сравнению со случаем, когда используются соотношения аналогичные [1], т.е. по соотношению $P = \omega \epsilon' \epsilon'' E^2$

Для моделирования распределения электромагнитного поля внутри древесины необходимо использовать строгие соотношения для расчета распределения плотности тока осевого излучателя (интегральное уравнение Поклингтона) в виде

$$\left(\frac{d^2}{ds^2} + k^2 \epsilon \mu \right) \int_L^L J(s') \frac{e^{-ik\sqrt{\epsilon\mu}R(s,s')}}{R(s,s')} ds' = i\omega E_{os}(s), \quad (2)$$

где $E_{as}(s)$ – поле сторонних источников; $R(s, s') = \sqrt{(s - s')^2 + r^2}$ – расстояние между точками наблюдения и интегрирования; ϵ_1 и μ_1 – диэлектрическая и магнитная проницаемость материала; $k = 2\pi / \lambda$; s – продольная координата, $k_1 = k\sqrt{\epsilon_1\mu_1}$.

Применительно к древесине, которая представляет собой диэлектрик с потерями, т.е. $\mu_1 = 0$, $\epsilon_1 = \epsilon_1' + i\epsilon_1''$. Для древесины с высокой влажностью $\epsilon_1' = 8$, $\epsilon_1'' = 1,3$ для древесины со средней влажностью $\epsilon_1' = 5$, $\epsilon_1'' = 0,9$, для древесины с малой влажностью $\epsilon_1' = 2$, $\epsilon_1'' = 0,23$.

Воспользуемся выражениями [7], однозначно определяющими поле излучения вибратора в материальной среде в сферической системе координат ρ, θ, φ :

$$E_\rho(\rho, \theta) = \frac{k_1 \rho}{w \epsilon_1} \int_{-L}^L J(s) G(\rho, \theta, s) \left(\frac{2R}{\rho} W_1 \cos \theta - ik_1 s W_2 \sin^2 \theta \right) ds,$$

$$E_\theta(\rho, \theta) = \frac{k_1 \rho}{w \epsilon_1} \int_{-L}^L J(s) G(\rho, \theta, s) \left[\frac{2R}{\rho} W_1 - ik_1 s W_2 (\rho - s \cos \theta) \right] ds, \quad (3)$$

$$H_\varphi(\rho, \theta) = \frac{ik_1 \rho \sin \theta}{c \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}} \int_{-L}^L J(s) G(\rho, \theta, s) R W_1 ds, \quad G(\rho, \theta, s) = \frac{e^{-ik_1 R}}{R^3},$$

$$R = \sqrt{\rho^2 - 2\rho s \cos \theta + s^2}, \quad W_1 = 1 + 1/ik_1 R, \quad W_2 = 1 + 3/ik_1 R - 3/k_1^2 R^2.$$

Анализ результатов

Сложный характер зависимости демонстрируют рис. 2, 3, на которых представлено распределение мощности электромагнитного поля для линейной эквидистантной решетки с пятью и четырьмя излучателями. На них отчетливо видна неравномерность распределения электромагнитного поля в направлении перпендикулярном расположению излучателей по

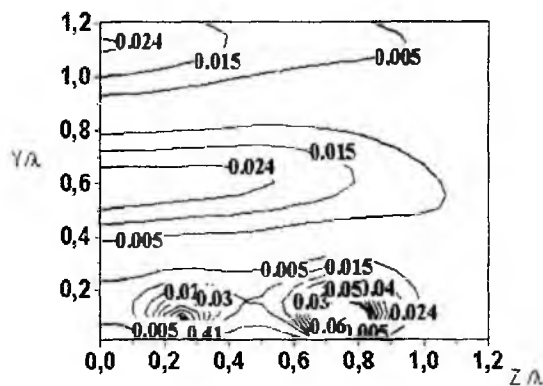


Рис. 2

сравнению с направлением, вдоль которого расположены излучатели. Схему расположения излучателей, описанная в работе [4], применима к модели сушильной камеры, представленной на рис. 1. Проведенные исследования по алгоритму [2], показали, что пренебрежение особенностями ближнего поля приводит к существенным ошибкам в определении величины и пространственного положения “максимумов” и “минимумов” излучения, которые находятся в промежуточной зоне решетки излучателей. На графиках, представленных на рис. 2,3, для распределения мощности электромагнитного

поля для свободного пространства, площадь которого соответствует пространству до начала расположения штабеля, которое соответствует промежуточной (средней) зоне решетки излучателей, расположение каждого излучателя изображено кружком на оси Z. При расчетах учитывались все компоненты электромагнитного поля – диполей Герца, расстояние между которыми соответствуют $0,5\lambda$.

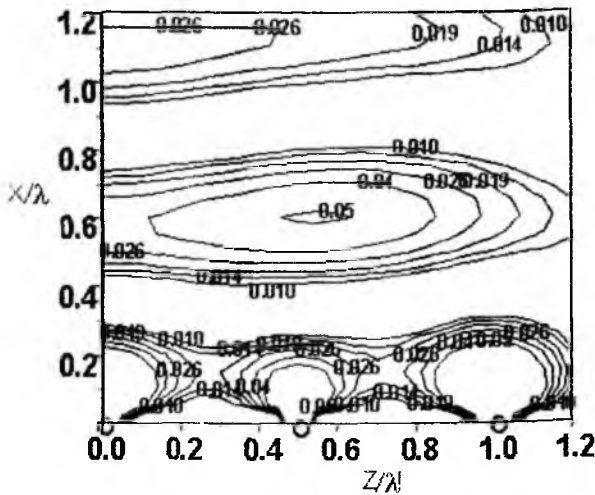


Рис. 3

представлено распределение мощности электромагнитного поля для пяти излучателей (рис. 3) при расстоянии между излучателями $0,5\lambda$.

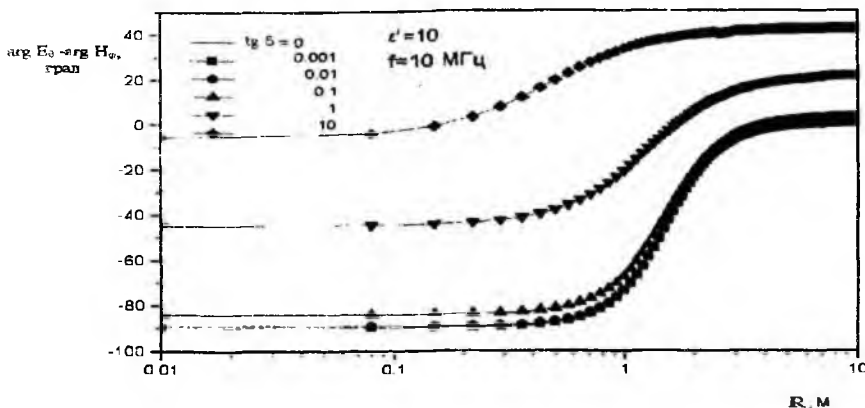


Рис. 4

Однако представленные зависимости нельзя использовать для описания закономерностей распределения электромагнитного поля в штабеле древесины, который представляет собой диэлектрик. Анализ амплитудных и фазовых характеристик электромагнитного поля показал, что выражения для всех компонент полей E и H диполя Герца применимы для анализа коротких проволочных вибраторных антенн [3-5]. Получить аналитические выражения для разности фаз между поперечными компонентами электромагнитного поля по соотношениям (3) невозможно в явном виде.

Авторами проведен анализ амплитудных и фазовых соотношений между компонентами электромагнитного поля диполя Герца в проводящей среде с произвольными значениями ϵ , μ и σ , представленных в [5].

Поскольку волновое число в них является комплексной величиной $k(\omega) = k'(\omega) + ik''(\omega)$, причем $k''(\omega) < 0$, то поле диполя с увеличением расстояния от него уменьшается за счет поглощения энергии в среде.

В общем случае (как сильного, так и слабого поглощения) действительная и мнимая части волнового числа выражаются следующими соотношениями [5]:

$$k'(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \sqrt{\varepsilon' \varepsilon_0 \mu' \mu_0} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon' \varepsilon_0} \right)^2} + 1 \right)^{1/2}, \quad k''(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \sqrt{\varepsilon' \varepsilon_0 \mu' \mu_0} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon' \varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Поток комплексной мощности в направлении $\theta = \pi/2$ определяется с помощью формулы

$$S = H_\varphi E_\theta e^{i\varphi}, \quad (5)$$

где φ – разность фаз между компонентами поля E_θ и H_φ [4].

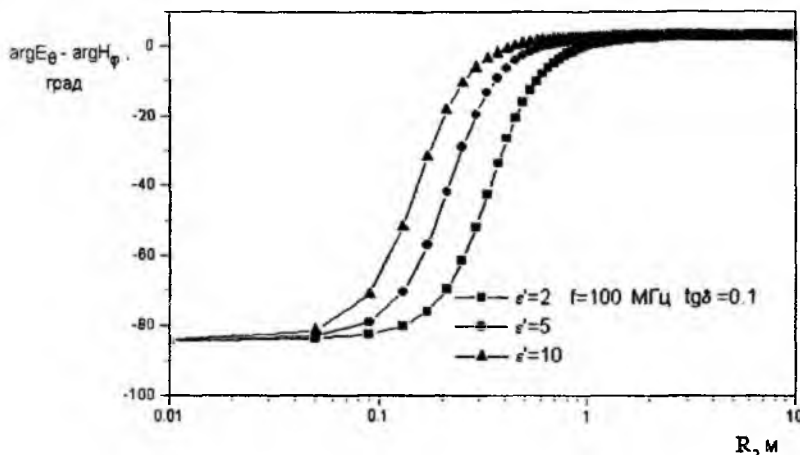


Рис. 5

В случае среды без потерь необходимо положить $\sigma = 0$, а $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$ [5,6]. В последнем случае формулы [4] совпадают с аналогичными выражениями для свободного пространства и все фазовые и амплитудные соотношения имеют тот же вид, что и в [5], с той разницей, что длина волны будет укороченной и определяется формулой $\lambda = 2\pi / \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$.

В случае малого поглощения ($\sigma / \omega \varepsilon \ll 1$) выражения для компонент поля диполя Герца можно расписать более подробно. Соответствующие преобразования приводят к следующему:

$$E_\theta = i \frac{\dot{y} L}{2\lambda} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} e^{-|k'|R} \sin \theta \frac{1}{(k'R)^2} \sqrt{((k'R)^4 - (k'R)^2 - 2(k''R)((k'R)^2 + 1))} \frac{e^{-ik''R}}{R} e^{i\varphi_{E\theta}}, \quad (6)$$

$$\varphi_{E\theta} = \text{arctg} \frac{2(k''R) - (k'R)^2}{(k'R)^2((k'R)^2 - 1 - (k''R))}, \quad (7)$$

$$E_R = -i \frac{\dot{y} L}{\lambda} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} e^{-|k'|R} \cos \theta \frac{1}{(k'R)^2} \sqrt{(k'R)^2 - 2(k''R)^3(k'R) + 1} \frac{e^{-ik''R}}{R} e^{-i\varphi_{ER}}, \quad (8)$$

$$\varphi_{ER} = \text{arctg} \frac{(k'R)^2 - 2(k''R)}{1 + k''R}, \quad (9)$$

$$H_\varphi = \frac{\dot{y} L \pi}{\lambda^2} e^{-|k'|R} \frac{\sin \theta}{(k'R)^2} \sqrt{(k'R)^2 + 1 - 2(k''R)(k'R)^3 + 2 \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} (k'R)^2 ((k''R) - (k'R) - 1)} \times \frac{e^{-ik''R}}{R} e^{i\varphi_{H\varphi}}, \quad (10)$$

$$\varphi_{H\varphi} = \text{arctg} \frac{(k'R)^2 - 2(k''R)^2 - \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} (k'R)(1 + k'R)}{(k'R)(1 + k'R) + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} ((k'R)^2 - 2(k''R))}, \quad (11)$$

где $k' = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$, $k'' = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sigma$, $|k''| \ll k'$.

Из этих выражений видно, что амплитуды и фазы всех компонент поля по сравнению со свободным пространством определяются не только проницаемостями ϵ и μ , но также и проводимостью σ среды.

Рассмотрим сначала общие закономерности влияния потерь в среде на характер волновых процессов в ближней и промежуточной зонах излучения [4]. Для этого в расчетах действительная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$ принималась равной определенной величине, а ее мнимая часть изменялась в широких пределах, и производились расчеты зависимостей от расстояния до точки наблюдения амплитуд и фаз компонент поля [5], а также плотности потока мощности поля. Как показано в [3-4], особенности волновых процессов вблизи излучателя в значительной степени определяются разностью фаз между компонентами E_θ и H_ϕ в точке наблюдения. На рис. 4 приведена зависимость разности фаз компонент E_θ и H_ϕ от расстояния при $\epsilon' = 10$ и изменении тангенса угла потерь от 0,001 до 10. В расчетах частота возбуждающего диполя Герца переменного тока принята равной 10 МГц. Из рисунка видно, что при малых потерях ($\text{tg } \delta = 0,001 \dots 0,01$) разность фаз между поперечными компонентами электрического и магнитного полей не отличается от разности фаз этих компонент для диполя Герца в свободном пространстве [3,4]. При ($\text{tg } \delta = 10 \dots 1$ на рис. 4), что соответствует малой влажности древесины (10%) наблюдается качественное изменение, в частности, вблизи излучателя разность фаз равна -85° и в дальней зоне она проходит через нуль и достигает нескольких градусов. При дальнейшем уменьшении потерь $\text{tg } \delta = 10 \dots 1$ на рис. 5 (что соответствует изменению ϵ' в процессе высушивания древесины хвойной породы) эти особенности усиливаются и приводят к качественному изменению характера волновых процессов. В частности, вблизи излучателя при $\text{tg } \delta = 1$ разность фаз $\Delta\phi = -45^\circ$ и проходит через нуль на расстоянии около 1 м, а затем увеличивается и в дальней зоне, где соответствующая кривая переходит в горизонтальную прямую, разность фаз равна примерно $+20^\circ$. Эти особенности еще больше усиливаются при увеличении потерь. Так, при $\text{tg } \delta = 10$ вблизи излучателя разность фаз равна -7° , проходит через нуль на расстоянии порядка 0,3 м и дальше увеличивается до $+45^\circ$, т.е. в волновой зоне характер излучения диполя Герца имеет реактивный характер. Разность фаз в $+45^\circ$ между компонентами приводит к тому, что поток мощности в зависимости от расстояния убывает быстрее, чем описываемый законом $(e^{-2\kappa \cdot R})/R^2$. Дополнительные расчеты показали, что обнаруженные здесь особенности изменения характера поля в ближней, промежуточной и дальней зонах излучения диполя Герца в зависимости от потерь в среде проявляются тем сильнее, чем больше ϵ' и чем больше потери. Рассмотрим влияние абсолютного значения действительной части диэлектрической проницаемости среды ϵ' на характер волновых процессов в ближней зоне диполя Герца. На рис.5 приведены расчеты разности фаз поперечных компонент электрического и магнитного полей от расстояния при ϵ' равном соответственно 2, 5 и 10 и параметре потерь $\sigma / \omega \epsilon_0 = 0,1$. Из расчетов видно, что в связи с тем, что потери не слишком большие, вблизи излучателя разность фаз компонент составляет -83° и при увеличении расстояния от излучателя до точки наблюдения характер волновых процессов существенно отличается. В частности, чем больше ϵ' , тем ближе к антенне расположена область ближних реактивных полей. В волновой зоне разность фаз для всех трех рассчитанных вариантов среды одинакова и составляет примерно $+5^\circ$. Таким образом, из приведенных расчетов видно, что разность фаз между компонентами в волновой зоне определяется не столько значением диэлектрической проницаемости среды, сколько потерями в этой среде. Из рис. 5 видно, что область дальней зоны, т. е. область, где разность фаз между E и H составляет 0 градусов, уменьшается с уменьшением ϵ' .

Выводы

1. Моделирование распределения электромагнитного поля в камере СВЧ-сушки древесины по отличающимся аналитическим выражениям для расчетов компонент электромагнитного поля в пространстве между стенками камеры и штабелем отличается разными ϵ и $\kappa(\epsilon)$.

2. Принцип суперпозиции для нахождения суммарных компонент электромагнитного поля E и H применим на расстояниях, соответствующих области внутри штабеля древесины, т.е. в дальней зоне.

3. Расчет распределения мощности электромагнитного поля в пространстве внутри камеры необходимо проводить, используя теорему Пойтинга для комплексных амплитуд на любом расстоянии от решетки излучателей.

4. При увеличении потерь энергии электромагнитного поля в штабеле древесины уменьшается протяженность области реактивного поля, т.е. пространственное распределение мощности электромагнитного поля вдоль штабеля будет существенно изменяться (уменьшаться) при прочих одинаковых условиях.

5. При построении электродинамической модели необходимо учитывать, что в начале процесса сушки область ближнего реактивного поля находится дальше излучателей и смещается к ним в процессе высушивания древесины.

Список литературы: 1. Яцкевич В.А., Прахов В.Г., Волков С.В., Климин А.И. Электродинамическое моделирование камеры для СВЧ-сушки древесины // Антенны. – 2008. – № 10. – С. 57- 61. 2. Корнев С.В. Некоторые особенности сушки пиломатериалов в СВЧ-камерах // Деревообрабатывающая промышленность. – 1998. – № 1. – С. 7-9. 3. Цехмистро Р.И. Особенности излучения телекоммуникационных импедансных проволочных антенн // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. – 2004. – № 139. – С. 28 -32. 4. Gorobets N.N., Gorobets Yu.N., and Tsekhmistro R.I. Near-Field Effects in the Electromagnetic Power Distribution in the Vicinity of an Array of Hertzian Dipoles // Telecommunications and radio engineering. – 1999. – Vol. 53, № 3. – P.24- 29. 5. Горобец Н.Н., Попов В.С., Цехмистро Р.И. Ближнее поле диполя Герца в поглощающей среде // Вісник Харк. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка. – 2002. – № 544. – С. 29-33. 6. Лавров Г.А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. – М.: Сов. радио, 1965. – 472 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 10.02.2011