

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ

5.2014



В.П. КИСМЕРЕШКИН, Г.Н. ЛОБОВА, Н.А. КОСТОЧКИНА, Д.В. РИТТЕР

Омский государственный технический университет

УСТАНОВКА ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО РАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА ОБЪЕКТОВ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Во многих отраслях производственной деятельности используют СВЧ-излучение. Среди задач применения СВЧ-излучения крайне важным является обеспечение объекта концентрацией СВЧ-излучения на его поверхности. Решение такой задачи является крайне актуальным для деревообрабатывающей и нефтеобрабатывающей промышленности, сельского хозяйства и других отраслей.

В деревообрабатывающей промышленности решение задачи качественной, быстрой и малозатратной сушки древесины остается актуальной, несмотря на достигнутые результаты. В последнее время усилился интерес к СВЧ-сушке древесины твердых пород. В содержании работы [1] для сушки древесины в установке предложено использовать комбинированный принцип действия, включающий конвективный и диэлектрический нагрев.

В работе [2] предложена СВЧ-вакуумная сушка, позволяющая высушивать оцилиндрованные бревна с начальной влажностью 80 % до конечной влажности 15 % с уменьшением энергозатрат. СВЧ-излучение, воздействуя на влажную древесину, приводит к закипанию влаги, которая создает избыточное давление. Такое давление приводит к выдавливанию из капилляров мелких капель влаги и образованию пара. Образовавшаяся влага выносится за пределы древесины диффузионным потоком. Горячий пар, выходящий из древесины, создает тепловую завесу, которая препятствует снижению температуры дерева.

В малогабаритной сушилке [3], позволяющей при значительной скорости сушки добиться высококачественного высушенного материала используют рабочую камеру, содержащую блок магнетронов и систему распределения энергии электромагнитного поля в диапазоне СВЧ по длине камеры.

Применяемые устройства для СВЧ-сушки древесины характеризуются трудностями концентрации мощности генераторов и распределения плотности энергии вдоль камеры, в которой происходит облучение объекта.

В настоящее время для СВЧ-сушки предложена установка, в основе которой лежит использование поверхностного волновода [4]. В такой установке нагреваемый объект размещают в поле поверхностного

волновода. Применение для СВЧ-сушки поверхностного волновода по сравнению с традиционными способами имеет следующие преимущества:

- в достижении минимальных значений металлоемкости установки, излучаемой мощности и мощности, которую требуется утилизировать;

- обеспечение равномерного нагрева длинномерных объектов сушки;

- значительное снижение стоимости установки для сушки древесины.

Применение поверхностного волновода позволяет разработать новые устройства СВЧ-сушки. В нашем случае речь идет об установке СВЧ-излучения, в которой используется вибраторная решетка на основе поверхностного волновода, расположенная внутри рефлектора в виде зеркального параболического проводящего цилиндра. Такая вибраторная решетка позволит получить равномерное распределение СВЧ-энергии на площади (поверхности).

Известна вибраторная решетка [5, 6], содержащая однопроводную линию передачи поверхностной волны и вибраторную решетку, образованную размещением вибраторов коллинеарно проводу однопроводной линии передачи (ОЛП) поверхностной волны.

При возбуждении однопроводной линии передачи устанавливается соответствующая поверхностной волне структура волны электромагнитного поля типа E_{00} , содержащая радиальную и продольную составляющие электрического поля, и соответствующую составляющую магнитного поля [7, 8]. Вибраторы решетки выполнены в виде цилиндров, надетых на провод, и установлены на проводе вдоль продольной линии напряженности электрического поля, радиальная составляющая поля не наводит электрического тока, т.к. направление радиальной составляющей напряженности электрического поля перпендикулярно оси вибратора. На рис. 1 показана схема расположения двух продольных вибраторов (фрагмент антенной решетки), которые надеты на провод ОЛП и возбуждаются под действием напряженности электрического поля волны E_{00} , распространяющейся в ОЛП.

Достижение равномерного распределения СВЧ-энергии для сушки объекта обеспечивается тем, что

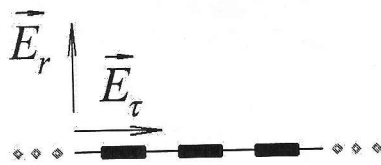


Рис. 1. Схема расположения вибраторов антенной решетки (фрагмент) и составляющих напряженности электрического поля в ОЛП

вибраторная решетка, содержащая однопроводную линию передачи поверхностной волны с размещенными соосно проводу вибраторами, расположена внутри зеркального параболического проводящего цилиндра на фокальной оси. В сечении, перпендикулярном фокальной оси расположена парабола с точкой фокуса, поэтому распределение поля, излученного антенной решеткой, в ортогональном оси решетки направлении близко к равномерному.

На рис. 2 изображена схема установки на основе поверхностного волновода для сушки объекта.

На рис. 2а схематично показан ход лучей, идущих от элемента антенной решетки. Из рис. 2б видно, что установка включает вибраторную решетку 1, состоящую из вибраторов 2, провод однопроводной линии передачи (ОЛП) 3, устройства возбуждения поверхностной волны 4, согласованную нагрузку 5, генератора СВЧ-колебаний 6 и зеркальный параболический проводящий цилиндр 7 (рефлектор).

Устройство возбуждения поверхностной волны [7] является трансформатором волн со структурой Т-волну Е-типа.

Коллинеарная антенная решетка 1 расположена внутри зеркального параболического проводящего цилиндра 7. Антенная решетка, входящая в установку, состоит из одинаковых вибраторов 2, представляющих собой объемные тела с проводящими цилиндрическими поверхностями, надетыми на диэлектрическую поверхность провода 3 однопроводной линии передачи (линия Губо [8]). ОЛП оканчивается согласованной нагрузкой 5. Генератор СВЧ-колебаний (6), расположенный вне зеркального параболического проводящего цилиндра (на рис. 2 не показан), соединен с узлом возбуждения поверхностной волны 4.

Установка для концентрации энергии на поверхности функционирует следующим образом.

Сигнал с генератора СВЧ-колебаний 6 с помощью устройства возбуждения 4 возбуждает в проводе 3 поверхностную волну E_{00} . В находящемся на проводе вибраторах 2 антенной решетки 1 под действием продольной составляющей напряженности электрического поля волны E_{00} наводится электрический ток, в результате чего происходит излучение СВЧ-энергии.

Излучение, порождаемое вибраторами 2, распространяясь внутри объема параболического цилиндра, выходит параллельным пучком лучей (рис. 2). Следовательно, энергия, приходящаяся на единицу площади раскрыва зеркального параболического цилиндра (плотность энергии), будет одинаковой.

Степень возбуждения вибраторов определяется коэффициентом связи « K_i » поверхностной волны из расчета достижения равномерного по длине L распределения энергии переизлучаемого поля Т-типа, осуществляемого под действием продольной составляющей напряженности электрического поля:

$$K_i = \frac{P_i}{P}$$

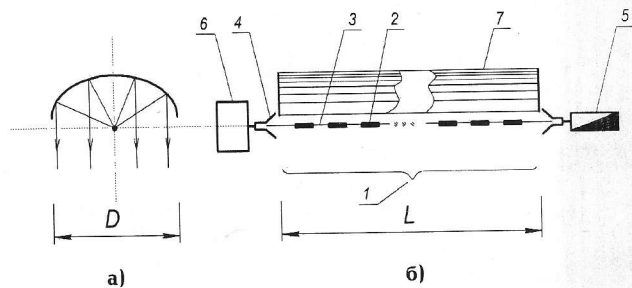


Рис. 2. Схема установки для концентрированного равномерного нагрева объектов СВЧ-излучением, а) ход лучей в раскрыве параболического цилиндра, б) структурная схема установки, где 1 — вибраторная решетка, 2 — вибратор, 3 — провод однопроводной линии передачи, 4 — устройство возбуждения, 5 — согласованная нагрузка, 6 — генератор, 7 — рефлектор

где P — мощность энергии СВЧ, переносимая поверхностной волной;

P_i — мощность энергии СВЧ, образованная поверхностной волной в i -том вибраторе рассматриваемой коллинеарной антенной решетки под действием продольной составляющей напряженности электрического поля [9].

Излучение коллинеарной антенной решетки, распространяясь внутри зеркального параболического цилиндра, отражается от поверхности параболоида и равномерно концентрируется на площади раскрыва параболического цилиндра S . Вибраторы, возбуждаясь под действием продольной составляющей напряженности электрического поля поверхностной волны E_{00} , в дальнейшем сами переизлучают электромагнитную энергию Т-структуры. Вся переизлученная СВЧ-энергия вибраторной решетки сосредоточена на площади раскрыва параболического цилиндра S , а оставшаяся (не переизлученная) СВЧ-энергия поступает на согласованную нагрузку 5.

Таким образом, вибраторная решетка, равномерно излучает СВЧ-энергию по всей длине L коллинеарной антенной решетки в ортогональной ОЛП плоскости, обеспечивая, концентрацию потока СВЧ-излучения на площади раскрыва зеркального параболического цилиндра S_p (рис. 2):

$$S_p = D \cdot L,$$

где D — диаметр раскрыва зеркального параболического проводящего цилиндра (рефлектора), L — длина коллинеарной антенной решетки.

Объект для поверхностного нагрева размещают в установке в области концентрации потока СВЧ-излучения.

Преимуществами установки на основе вибраторной решетки, размещенной на проводе поверхностного волновода и обеспечивающей концентрацию энергии СВЧ-излучения на поверхности (площади) объекта, являются:

- во-первых, достигается равномерное распределение плотности СВЧ-излучения в раскрыве зеркального параболического проводящего цилиндра, которая обусловлена размещением на фокальной оси коллинеарной антенной решетки излучателей;

- во-вторых, частичная электрическая замкнутость объема зеркального параболического проводящего цилиндра обеспечивает частичное экранирование процессов в объектах, находящихся внутри зеркального параболического цилиндра;

- в-третьих, происходит увеличение концентрации СВЧ-энергии на заданной поверхности (площади) S_0 ;

— в-четвертых, минимальные металлоемкость и стоимость установки.

Предложенная конструкция установки может быть использована не только для сушки древесины в деревообрабатывающем производстве, но и в сельском хозяйстве, а также для СВЧ-нагрева объектов, используемых в различных отраслях промышленности.

Первоначально оценим энергозатраты на сушку заданного объема конкретной древесины (ель), имеющей определенную начальную влажность W_n , которую надо довести до конечной влажности W_k в течение определенного времени t . Учитывая сложную зависимость энергозатрат от количества влаги диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и затухания энергии с глубиной, сначала следует ограничиться решением статической задачи. В дальнейшем, учитывая особенности установки, внесем соответствующие коррективы.

Найдем связь между подводимой мощностью P_0 , временем экспозиции t и начальной влажностью древесины W_n . Прежде всего, определимся с частотой генератора, типом древесины, начальной и конечной влажностью.

Итак, подводимая мощность P_0 подается на устройство возбуждения поверхностной волны в проводе, связанном определенным образом с коллинеарной антенной решеткой. Допустим, потери мощности составят 5 %. Учитывая, что большая часть установки экранирована, можно допустить, что потери малы и ими можно пренебречь. Тогда поток мощности в раскрыве параболического цилиндра будет

$$|\Pi| = \frac{0,95P_0}{S_p} = \frac{0,95P_0}{D \cdot L}$$

где D — раскрыв параболы, L — длина антенной решетки.

Нагреваемый объект имеет площадь, на которую падает поток $|\Pi|$, равную S_0 . Поэтому на объект падает поток в $D \cdot L/S_p$ раз меньший, т.е. $|\Pi|_0 = \frac{0,95P_0S_0}{(D \cdot L)^2}$.

Поток $|\Pi|_0$ порождает в объекте напряженность электрического поля E_0 , равную

$$\sqrt{|\Pi|_0} \cdot \sqrt{Z} = E_0$$

и в объекте выделяется мощность, равная

$$P_A \approx \omega t g \delta \varepsilon V E_p^2,$$

где ω — круговая частота, V — объем объекта, ε — относительная диэлектрическая проницаемость, $t g \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь, E_p — напряженность электрического поля в объекте.

Выделяемая в объекте мощность приводит к тепловыделению Q , которое связано с теплоемкостью c , массой объекта m и разностью между начальной и конечной температурой нагрева ΔT . Поэтому имеет место равенство

$$Q = \frac{P_A}{t} = cm\Delta T.$$

Таким образом, уравнение

$$0,95P_0Z\omega t g \delta \varepsilon V h \left(\frac{S_0}{P_p} \right)^2 = cm\Delta T \cdot t$$

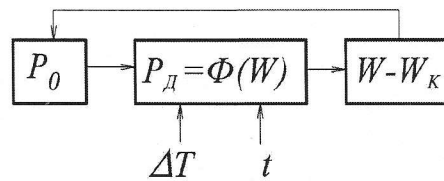


Рис. 3. Схема алгоритма процесса сушки объекта

связывает электродинамические и физические параметры с энергетикой и временем экспозиции. Что касается влажности, она в неявном виде скрыта в диэлектрической проницаемости и тангенсе угла диэлектрических потерь в виде несложных выражений.

Представленное уравнение параметрическое, т.к. $t g \delta$, ε , Z зависят от времени экспозиции и характер зависимости считать линейным нельзя. Указанные явления предстоит дополнительно исследовать теоретически и экспериментально.

Для примера проведем расчет требуемой мощности СВЧ генератора для нагрева древесины типа «ель» на $\Delta T = 60^\circ \text{C}$ за время, равное 4 час. Частота колебаний $f = 915 \text{ МГц}$. Объем древесины $V = (0,2 \times 0,9 \times 3) \text{ м}^3$. Начальная влажность $W_n = 40\%$, конечная $W_k = 8\%$. Положим, что относительная диэлектрическая проницаемость сухой древесины $\varepsilon = 4,2$, а влажной $\varepsilon = (8 \div 10)$, соответственно, удельная проводимость сухой древесины $\sigma = 10^{-3} \text{ См/м}$, а влажной $\sigma = 10^{-2} \text{ См/м}$. Удельная теплоемкость $c = 1,7 \text{ кДж/кг К}$.

$$A = \frac{cm\Delta T}{0,95Z\omega t g \delta \varepsilon h \left(\frac{S_0}{S_p} \right)^2},$$

$$P_0 = At, \text{ где}$$

где $\varepsilon \omega t g \delta = \sigma$ — удельная проводимость,

Z — волновое сопротивление облучаемого объекта,

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{120\pi}{3} \approx 125 \text{ Ом}.$$

$$P_0 \approx 10,5 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Таким образом, при времени нагрева 4 часа доведение массы объекта до разности температур $\Delta T = 60^\circ \text{C}$ потребуются $P_0 = 7,5 \text{ кВт}$.

Далее потребуется испарить влагу в количестве, определяемой начальной и конечной влажностью. Теплота парообразования $Q_n = \lambda m$. Соответственно, требуемая мощность источника нагрева составит Q_n/t . Так как тепловыделение P_A поддерживается постоянно, то затраченное время определяется формулой

$$t_1 = \frac{Q_n}{P_A} = \frac{Q_n}{\sigma h \left(\frac{S_0}{S_p} \right)^2 0,95P_0Z}$$

Итак, проведенный расчет показывает, что энергетические затраты мало зависят от способа реализации сушки. Вместе с тем резервы экономии энергии есть. Они заключены в организации процесса сушки по некоторому критерию, который вводится в систему авторегулирования мощности и времени завершения сушки. Алгоритм сушки может быть записан в виде (рис. 3).

Процесс сушки завершается достижением конечного значения требуемой влажности W_k .

Адаптивной задачей исследования является применение натрального экспериментатора на установке, в основе которой лежит преобразовательная конструкция.

Библиографический список

1. СВЧ пьезо вакуум: от сложного к простому [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.svch-technologies.ru/HTML/lesprom04-10.pdf> (дата обращения: 07.10.2011).
2. Технологический ресурс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.get-ground.ru/articles/1.php> (дата обращения: 07.10.2011).
3. Маломощная СВЧ сушка для асбеста [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kodasagregat.ru/z12st4.htm> (дата обращения: 19.08.2011).
4. Адаптивная СВЧ сушка опытной установки СВЧ-сушки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://conf.omgtu.ru/node/20> (дата обращения: 09.09.2011).
5. Пат. 2118874 Российская федерация, МПК Н 01 О 21/00. Выборочная решетка [Текст] / Кисмерешкин В. П., Лобова Г. Н.; заявитель и патентообладатель Опытнo-конструкторское бюро «Иртыш». — № 94020606/09; заявл. 02.06.1994; опубл. 10.09.1998, Бюл. № 25. — 6 с.
6. Кисмерешкин В. П. Об использовании открытых линий передачи в антенной технике / В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова // Антенно-фидерные устройства, системы и средства исследования и обслуживания. — М.: СВЧ-технологии, 2014. — 12 с.
7. Пат. 2144720 Российская федерация, МПК Н 01 Q 9/00, Н 01 Q 9/44. Устройство возбуждения поверхностной волны [Текст] / Кисмерешкин В. П., Лобова Г. Н. — № 98118738/09; заявл. 12.10.1998; опубл. 20.01.2000, Бюл. № 2. — 12 с.
8. Ефимов, И. Е. Радиочастотные линии передачи / И. Е. Ефимов. — М.: Сов. Радио, 1964. — 600 с.
9. Кисмерешкин В. П. Моделирование линейной антенной решетки на основе однополосной линии передачи / В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова // Приборы и техника эксперимента. — 1996. — № 5. — С. 85–86.

Статья поступила в редакцию 10.02.2014 г.
© В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова, Н. А. Косточкина, Д. В. Риттер