

УДК 674.047.3

Применение СВЧ-излучения для технологической сушки дерева и пиломатериалов

Г.А. Ляшенко, И.А. Черепнев, М.А. Черная

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенка (г. Харьков, Украина)*

В статье рассмотрены различные методы сушки древесины. Проводится сравнение индукционного, инфракрасного и микроволнового нагрева. Индукционный нагрев рассматривается как нагрев токопроводящих тел за счет возбуждения в них электрических токов переменным электромагнитным полем, а инфракрасный нагрев как нагрев материалов электромагнитным излучением с длиной волны 2 мм – 760 нм. Микроволновой нагрев рассматривается как наиболее оптимальный способ сушки древесины. Он основан на проникновении в материал электромагнитной энергии и преобразовании ее в тепловую. Цель статьи заключается в определении оптимальных параметров электромагнитного излучения для сушки древесины. При микроволновом нагреве распределение температур в нагреваемом материале таково, что градиенты температуры, давления, концентрации влаги направлены в одну сторону от центра к периферии, что ускоряет сушку древесины. Приведены уравнения для расчета расхода жидкости через капилляр древесины. Показана зависимость теплоты, выделяемой в древесине под воздействием электромагнитного поля, от частоты поля, напряженности поля и от диэлектрических параметров древесины. Уточнены параметры СВЧ-излучения для оптимизации процесса сушки древесных плит и пиломатериалов. Качество сушки улучшается за счет того, что нагрев высушенных участков автоматически прекращается. Нагрев продолжается лишь там, где еще сохранилась повышенная влажность. Учеными электрофизические параметры сушки древесины в достаточно широком диапазоне частот. Диэлектрические свойства древесины рассматриваются через диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Рекомендованы частоты СВЧ облучения для различных значений параметров штабеля древесины. Менять частоты произвольно для оптимизации процесса сушки древесины не представляется возможным, поэтому разработчики могут варьировать технологическими параметрами штабеля древесины или пиломатериалов и параметрами камеры для сушки древесины. Показана возможность с высокой скоростью подвести и выделить в единице объема древесины мощность, не доступную ни одному из традиционных способов подвода энергии. Показано применение бесконтактного избирательного нагрева. Обоснованы пути повышения эффективности сушки древесины в электромагнитном поле сверхвысокой частоты.

Ключевые слова: СВЧ сушка, микроволновый нагрев, древесина, диффузия пара, диэлектрик.

Введение. Необходимость сушки древесины привела к созданию разнообразных сушильных установок. В принципе сушка древесины заключается в удалении влаги путем испарения. Механические методы обезвоживания неприменимы к древесине. Ротационное и ультразвуковое обезвоживание недостаточно снижают влажность древесины до уровня 42-48%.

Из всего спектра электромагнитных волн для нагрева и сушки древесины применяют в основном электрические колебания промышленной частоты (индукционный нагрев), радиоволны высоких и сверхвысоких частот (диэлектрический или микроволновый нагрев) и инфракрасное излучение (инфракрасный нагрев).

Индукционный нагрев – это нагрев токопроводящих тел за счет возбуждения в них электрических токов переменным электромагнитным

полем. Источниками электромагнитного поля служат индукторы. Для сушки древесины применяется промышленная частота 50 Гц.

Недостаток этого вида сушки состоит в невысоком качестве высушенного материала, что связано с большой неравномерностью нагрева, местными перегревами, большими внутренними напряжениями. Себестоимость индуктивной сушки в два раза выше себестоимости известной камерной сушки [1].

Инфракрасный нагрев – это нагрев материалов электромагнитным излучением с длиной волны 2 мм -760 нм. Этот вид нагрева основан на свойстве материалов поглощать данную часть спектра излучения. Инфракрасные излучатели, состоящие из источника энергии и отражателя, обеспечивают глубокий или поверхностный нагрев облучаемого тела или, при необ-

ходимости, локальную сушку объекта. Данный вид сушки древесины широкого распространения не получил в связи с низкой степенью проникновения инфракрасных волн в объект.

Микроволновый нагрев (диэлектрический, СВЧ нагрев) основан на проникновении электромагнитной энергии в материал и преобразовании ее в тепловую энергию. Проникновение электромагнитной энергии в материал происходит мгновенно. Ее поглощение составляющими материала происходит по-разному в зависимости от их диэлектрических свойств. Распределение тепловой энергии в материале происходит иначе, чем при тепловой обработке – максимум температуры находится в середине тела. Создаваемое при микроволновом нагреве распределение температур в нагреваемом материале таково, что градиенты температуры, концентрации влаги и давления направлены в одну сторону от центра к периферии, что способствует эффективности сушки [1].

Цель работы состоит в уточнении некоторых параметров СВЧ – излучения для оптимизации процесса сушки древесных плит и пиломатериалов.

Качество получаемого материала существенно улучшается за счет того, что ранее нагрев высушенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов, как, например, дерево, прямо пропорционален влажности. Поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери ВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность. При СВЧ сушке древесины основной движущей силой влаги является избыточное давление, которое образуется при испарении этой же влаги. Расход жидкости через капилляр древесины при описании течения жидкости уравнением Пуазейля равен [2]:

$$\Theta = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \mu l}, \quad (1)$$

где r – радиус капилляра; Δp – разность давления на концах капилляра; μ – вязкость жидкости; l – длина капилляра.

Исследованиями установлено, что в пределах скоростей 0 - 8 см/с фильтрационный поток имеет ламинарный режим [2]. При скоростях более 8 см/с режим ламинарного движения переходит в турбулентный режим, и сопротивление капилляра резко повышается. Поэтому дальнейшее повышение избыточного давления не приводит к увеличению расхода жидкости через капилляр. Размеры капилляров в древесине колеблются от 10^{-5} до 10^{-8} см.

Согласно формуле 1, при условии, что расход жидкости останется постоянным, при уменьшении размера капилляра в 2 раза давление должно вырасти в 16 раз.

Теплота, выделяемая в древесине под действием электромагнитного поля зависит от частоты и напряженности поля, а также от диэлектрических параметров древесины [1]

$$p = 0,55 \varepsilon \operatorname{tg}(\delta) f E^2 10^{-12}, \quad (2)$$

где p – удельная мощность, Вт/см²; ε – диэлектрическая проницаемость древесины; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь; E – напряженность электрического поля, В/см; f – частота тока, Гц.

Очевидно, чтобы оптимизировать процесс сушки древесины СВЧ-полями, необходимо учитывать ее электрофизические параметры в достаточно широком диапазоне частот. Диапазон обусловлен выделенными частотами для промышленных нагревательных устройств: 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц [1], технологически разработанными приборами генерации электромагнитной энергии в СВЧ-диапазоне большой мощности, разновидностью древесного материала, значением влагосодержания.

Находящаяся в переменном электрическом поле древесина проявляет свои диэлектрические свойства, которые характеризуются двумя показателями. Первый из них – относительная диэлектрическая проницаемость ε – численно равен отношению емкости конденсатора с прокладкой из древесины к емкости конденсатора с воздушным зазором между электродами. Вторым показателем – тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ – определяет долю подведенной мощности, которая поглощается древесиной и превращается в теплоту. Диэлектрическая проницаемость абсолютно сухой древесины с увеличением плотности возрастает. Так, у древесины бальзы ($\rho_0 = 130$ кг/м³) диэлектрическая проницаемость поперек волокон в диапазоне частот 10 - 10^{11} Гц составляет в среднем 1,3, а у граба ($\rho_0 = 800$ кг/м³) – 2,6. Проницаемость вдоль волокон больше в среднем в 1,4 раза. С повышением влажности древесины ее увеличивается, так как для воды величина этого показателя в диапазоне частот 10 - 10^{11} Гц составляет 81 - 7,5. При влажности 10% и температуре 20°C для древесины плотностью $\rho_0 = 500$ кг/м³ на частоте 10^4 Гц равна 4,2, на частоте 10^{10} Гц – 2,0, а при влажности 60% – соответственно равна 6,5 и 6,6. Увеличение температуры от –40 до 100°C для абсолютно сухой древесины приводит к незначительному увеличению (примерно в

1,3 раза). Повышение температуры влажной древесины приводит к более существенному увеличению [3].

Тангенс угла диэлектрических потерь также зависит от плотности древесины. Поперек волокон $\operatorname{tg} \delta$ при плотности $\rho_0 = 500 \text{ кг/м}^3$ и комнатной температуре в диапазоне частот $10 - 10^5$ Гц составляет $0,005 - 0,007$, а при плотности $\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ этот показатель равен $0,007 - 0,025$. Вдоль волокон $\operatorname{tg} \delta$ выше, чем поперек волокон, в среднем в 1,7 раза. С повышением влажности $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается. Зависимости этого показателя от частоты имеют сложный характер. Так, для древесины с плотностью $\rho_0 = 500 \text{ кг/м}^3$ при температуре 20°C и влажности 80% значение $\operatorname{tg} \delta$ при частоте 10^3 Гц достигает 74, при частоте 10^8 Гц снижается до 0,2, а в области сверхвысоких частот (10^{10} Гц) возрастает до 0,34. Повышение температуры абсолютно сухой древесины вызывает снижение $\operatorname{tg} \delta$, но в области СВЧ этот показатель возрастает. У влажной древесины ($W = 25\%$) нагревание приводит к существенному возрастанию $\operatorname{tg} \delta$, но в области СВЧ он меняется незначительно [3]. Используя усредненные данные определим зависимость глубины проникновения электромагнитного поля в зависимости от частоты в пределах $10^8 - 10^9$ Гц при влажности исходного материала 60%.

Равномерное достаточно интенсивное воздействие на обрабатываемые пиломатериалы способствует не только увеличению скорости влагоудаления без риска их коробления из-за неодинаковости температуры их нагрева, но и позволяет гарантированно осуществить дезинсекцию древесины как на ее поверхности, так и во всем ее объеме одновременно, поскольку размеры штабеля древесины подбираются так, чтобы глубина проникновения поля в обрабатываемый штабель, равная

$$\Delta = \frac{2c}{\pi f \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta}, \quad (3)$$

соответствовала бы ослаблению волны к центру штабеля примерно в 4 раза [4]. При этом, поскольку воздействие осуществляется с четырех сторон, а в центре штабеля все воздействия интегрально складываются, то в объеме всего штабеля интенсивность поля и, соответственно, нагрев, естественно будут примерно одинаковыми.

Исходя из приведенных соображений согласно приведенного графика можно рекомен-

довать частоты СВЧ облучения для различных значений объемных параметров штабеля древесины (размеры досок, пиломатериалов). Эти размеры, в свою очередь, определяют оптимальные размерные параметры сушильных камер.

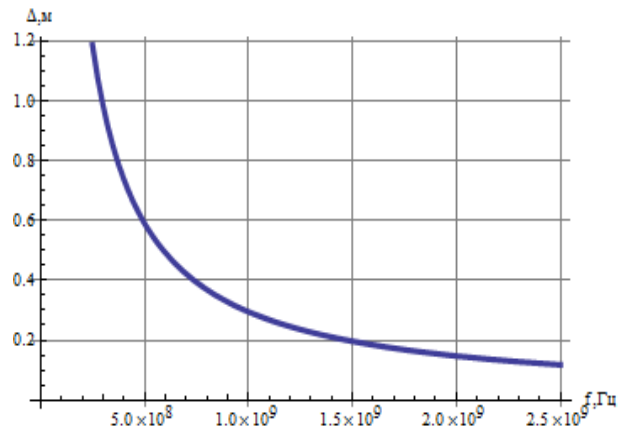


Рис. 1 Зависимость глубины проникновения поля в штабель, м от частоты, Гц

Избирательность СВЧ нагрева при сушке древесины заключается в том, что с уменьшением влажности древесины в процессе нагревания уменьшается выделяемая в древесине теплота. Проникая в древесину, напряженность электрического поля E затухает по экспоненте

$$E = E_0 e^{-\alpha x}, \quad (4)$$

где E_0 – напряженность на поверхности древесины, В/м; α – коэффициент затухания волны; x – расстояние от поверхности древесины до точки, на которой определяется напряженность, м.

Из рис. 1 на котором изображена зависимость напряженности электрического

поля от глубины проникновения СВЧ поля в древесину при разных частотах, видно, что наиболее приемлемыми для сушки древесного сырья являются частоты 433 МГц и 915 МГц.

При СВЧ сушке необходимо защищать древесину от возможного перегрева наиболее влажных внутренних слоев. Эта задача решается выбором соответствующего режима сушки, температура сушки древесины в процессе не должна превышать для хвойных пород 100°C , для березы и дуба соответственно 90°C и 70°C .

Следует отметить, что СВЧ установки относительно мало энергоемки. Расход энергии на сушку одного кубометра пиломатериалов хвойных пород составляет 65 кВт/ч и менее (в зависимости от сечения), для березы – 88 кВт/ч, для дуба – 130 кВт/ч и менее при этом рекомендовано режим комбинированной сушки СВЧ с вакуумной и конвективной сушкой, так как при

этом достигается наряду с высокой скоростью высокое качество высушенных пиломатериалов [1]. При использовании метода СВЧ сушки необходимо не допускать возникновения эффекта стоячей волны при обеспечении равномерного облучения штабеля [4]. Для этого применяют несколько независимых (некогерентных) генераторов СВЧ, которые располагают по обе стороны от штабеля. Таким образом с учетом соотношений (2), (3), (4) и графика (рис. 1) максимальная ширина штабеля при частоте 433 МГц - порядка 0,7 м, при частоте 2450 МГц порядка 0,12 м.

Выводы.

1. Ввиду того, что менять частоты произвольно для оптимизации процесса сушки не представляется возможным по причине необходимости придерживаться существующих стандартов разработчики могут варьировать технологическими параметрами штабеля древесины или пиломатериалов и параметрами камеры для сушки древесины;

2. Для сушки древесины и пиломатериалов в промышленных масштабах может быть рекомендована частота СВЧ воздействия 433 МГц;

3. из приведенных соотношений следует, что на расстоянии глубины проникновения электромагнитного излучения мощность составляет только около 14% от мощности на поверхности штабеля, поэтому максимальная ширина штабеля при частоте 433 МГц составляет примерно 0,7 м.

4. при осуществлении промышленной сушки пиломатериалов рекомендован режим комбинированной СВЧ сушки с вакуумной и конвективной сушкой, повышающий эффективное осуществление бесконтактного избирательного нагре-

ва и получение требуемого распределения температур в древесине, в том числе в режиме саморегулирующегося нагрева.

5. продолжительность сушки зависит от мощности облучения, количества генераторов и диаграмм направленности облучающих систем, объема загрузки, разновидности древесины, выбранной частоты СВЧ облучения и, по разным оценкам [4], составляет от 18 до 20 часов при значениях начальной влажности 35% и конечной 8%.

Литература

1. Рахманкулов Д.Л. Применение микроволнового излучения для сушки дерева и пиломатериалов [Текст] / Д.Л. Рахманкулов, С. Ю. Шавкунова, И.Н. Вихарева // Башкирский химический журнал. – 2008, Т. 15, № 1 – С. 46 - 52.

2. Лифшиц А.В. Высокочастотная электро-термическая обработка неметаллического вторичного сырья [Текст] / А.В. Лифшиц, Н.Г. Филиппенко, А.Г. Ларченко, С.Н. Филатова // Наука и образование: Электронный научно-технический журнал. – М.: МГТУ им. Баумана, – 2014, – №6 – С. 55 – 59.

3. Электрические свойства древесины [Электронный ресурс] / МСХА: Зооинженерный факультет. – Режим доступа: <http://activestudy.info/electricheskie-svoystva-drevesiny/>

4. Демьянчук Б. А. Принципы применения микроволнового нагрева [Текст] / Б.А. Демьянчук. – Одесса: Черноморье, 2004. – 519 с.

Анотація

Застосування НВЧ-випромінювання для технологічної сушки дерева і пиломатеріалів

Г.А. Ляшенко, І.А. Черепнев, М.О. Черная

У статті розглянуті різні методи сушки деревини. Проводиться порівняння індукційного, інфрачервоного і мікрохвильового нагріву. Індукційний нагрів розглядається як нагрів струмопровідних тіл за рахунок збудження в них електричних струмів змінним електромагнітним полем, а інфрачервоний нагрів як нагрів матеріалів електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі 2 мм - 760 нм.

Мікрохвильовий нагрів розглядається як найбільш оптимальний спосіб сушіння деревини. Він заснований на проникненні в матеріал електромагнітної енергії і перетворенні її в теплову.

Мету статі наведено, як визначення оптимальних параметрів електромагнітного випромінювання для сушіння вологої деревини.

При мікрохвильовому нагріванні розподіл температур в нагрітому матеріалі такий, що градієнти температури, тиску, концентрації вологи спрямовані в один бік від центру до периферії, що прискорює сушку деревини. Наведено рівняння для розрахунку витрати рідини через капіляр деревини.

Показана залежність теплоти, що виділяється в деревині під впливом електромагнітного поля, від частоти поля, напруженості поля і від діелектричних параметрів деревини. Уточнено параметри НВЧ-випромінювання для оптимізації процесу сушіння деревних плит і пиломатеріалів.

Якість сушіння покращується за рахунок того, що нагрів висушених ділянок автоматично припиняється. Нагрівання триває лише там, де ще збереглася підвищена вологість. Враховано електрофізичні параметри сушки деревини в досить широкому діапазоні частот.

Діелектричні властивості деревини розглядаються через діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат. Рекомендовані частоти НВЧ опромінення для різних значень параметрів штабеля деревини. Міняти частоти доволіно для оптимізації процесу сушіння деревини не представляється можливим, тому розробники можуть варіювати технологічними параметрами штабеля деревини або пиломатеріалів і параметрами камери для сушки деревини. Показана можливість з високою швидкістю підвести і виділити в одиниці об'єму деревини потужність, не доступну жодному з традиційних способів підведення енергії. Показано застосування безконтактного виборчого нагріву. Обґрунтовано шляхи підвищення ефективності сушіння деревини в електромагнітному полі надвисокої частоти.

Ключові слова: СВЧ сушка, мікрохвильовий нагрів, деревина, дифузія пари, діелектрик.

Abstract

The use of microwave radiation for technological wood and lumber drying

G.A. Lyashenko, I.A. Cherepnev, M.A. Chernaya

The article considers the different methods of drying wood. Are compared the induction, infrared and microwave heating. Induction heating is considered as a heat conductive material through which the excitation of electrical currents in an alternating electromagnetic field, and infrared heating as heating of materials with electromagnetic radiation with a wave length of 2 mm - 760 nm.

Microwave heating is considered as the optimal method of drying wood. It is based on the penetration of electromagnetic energy into the material and converting it into heat. The purpose of the article is to determine the optimal parameters of electromagnetic radiation for drying wood.

With microwave heating temperature distribution of the heated material is such that temperature gradients, pressure and moisture concentration directed to one side from the center to the periphery, which accelerates the drying of the wood. The equations for calculating the fluid flow rate through the capillary of timber are considered.

The dependence of the heat generated in the wood under the influence of electromagnetic field, the field frequency, field strength and dielectric parameters of the of timber is shown. The microwave radiation parameters for optimizing the drying process of wood-based panels and lumber clarified.

Drying quality is improved owing to the fact that the heating of the dried areas is automatically terminated. Heating is continued only there where it is still kept humid. Takes into account electrophysical parameters of drying wood in a fairly wide range of frequencies.

Dielectric properties of wood are considered through the dielectric constant and dielectric loss tangent. Frequencies of microwave radiation for different values of the parameters of the wood pile are recommended. It is not possible to change randomly the frequency to optimize the wood drying process, so developers can vary the process parameters and the parameters of camera settings for drying wood. It is possible to draw with high speed and highlight in a unit volume of timber the capacity which is not available to any of the traditional ways of energy supply. The application of non-contact selective heating is shown. The ways of increasing the efficiency of drying wood in the electromagnetic field of ultrahigh frequency are considered.

Key words: *microwave drying, microwave heating, wood, vapor diffusion, a dielectric.*

Представлено: І.А. Фурман / Presented by: I.A. Furman

Рецензент: О.Ю.Сергієнко / Reviewer: O.Yu. Sergiyenko

Подано до редакції / Received: 28.01.2016