

## К ОБОСНОВАНИЮ СПОСОБА ОТДЕЛЕНИЯ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ СВЧ-НАГРЕВОМ И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

доктор технических наук, профессор **В.И. Посметьев**<sup>1</sup>

кандидат технических наук, доцент **М.А. Латышева**<sup>1</sup>

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

В настоящее время прогрессивным направлением получения и обработки материалов является использование технологии СВЧ электротермии. Широкие внедрения и развитие технологии получения древесной зелени (ДЗ), являющейся ценным сырьем для различных отраслей народного хозяйства – в медицине, парфюмерии, комбикормовой и других. Учеными ВГЛТУ были выполнены исследования по разработке технологии и оборудования для получения высококачественной ДЗ перспективным способом, основанном на использовании энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля. В его основе лежит трансформация энергии электромагнитного поля СВЧ в теплоту, которая инициируется непосредственно внутри обрабатываемого диэлектрического материала по всему его объему, практически независимо от конфигурации последнего. Основное преимущество этого способа по сравнению с известным термическим способом, основанным на передаче теплоты в материал путем СВЧ-излучения, – возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый объект, а также высокий КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, близкий к 100 %. Представлены варианты математического моделирования процесса сушки материалов с использованием СВЧ-энергии. Разработана математическая модель, позволяющая определить характер изменения электрофизических характеристик ( $\epsilon'$  и  $tg\delta$ ) хвои от температуры, что позволит произвести расчет рабочей камеры установки для отделения. В основу математического моделирования были положены известные положения и методики теории тепло- и массообмена, широко используемые при исследовании диэлектрических материалов и биологических объектов. Лежащий в основе традиционной технологии механический способ отделения ДЗ ведет не только к большой засоренности различными вредными примесями конечного продукта, но и к значительному дроблению и травмированию хвои, а следовательно, к снижению полезных свойств и быстрой ее порче.

**Ключевые слова:** древесная зелень, СВЧ-нагрев, теплообмен и массообмен, хвойные лапки.

## TO THE JUSTIFICATION OF THE METHOD OF SEPARATING WOOD GREEN MICROWAVE HEATING AND THE MAIN PARAMETERS OF THE INSTALLATION FOR ITS IMPLEMENTATION

Doctor of technical Sciences, Professor **V.I. Posmetyev**<sup>1</sup>

Candidate of technical Sciences **M.A. Latysheva**<sup>1</sup>

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation

### Abstract

Currently, the progressive direction of obtaining and processing of materials is the use of microwave electrothermy technology. Wide introduction and development of technology for the production of Dre-spring greens (DZ),

which is a valuable raw material for various sectors of the economy – in medicine, perfumes, feed and others. VGTU scientists have completed the research for the development of technology and equipment to produce a high quality DZ promising method based on the use of energy of microwave (MW) electromagnetic field. It is based on the transformation of the energy of the electromagnetic microwave field into heat, which is initiated directly inside the processed dielectric material throughout its volume, almost regardless of the configuration of the latter. The main advantage of this method compared with the known thermal method based on the transfer of heat to the material by microwave – the ability to practice instantaneous switching on and off the thermal effects on the treated object, as well as high efficiency conversion of microwave energy into thermal, close to 100 %. The variants of mathematical modeling of drying materials using microwave energy. A mathematical model was developed that allows to determine the nature of the change in the electrophysical characteristics ( $\epsilon'$  and TGV) of needles from the temperature, which will make it possible to calculate the working chamber of the unit for separation. The mathematical modeling was based on the known positions and methods of the theory of heat and mass transfer, widely used in the study of dielectric materials and biological objects. The traditional mechanical method of separation of DM leads not only to high contamination with various harmful impurities of the final product, but also to a significant fragmentation and injury of needles, and, therefore, to a decrease in the useful properties and its rapid deterioration.

**Keywords:** woody greens, microwave heating, heat exchange and mass transfer, coniferous paws

Необходимость рационального использования лесных ресурсов страны создает обоснованные предпосылки для развития и широкого внедрения технологии получения древесной зелени (ДЗ), являющейся ценным сырьем для различных отраслей народного хозяйства – в медицине, парфюмерии, комбикормовой и других. ДЗ составляет 3-5 % биомассы дерева, что с учетом значительных объемов заготавливаемой древесины в стране позволяет полезно использовать не менее 5 млн т этого ценного сырья в год. В клетках свежей ДЗ, особенно хвойных пород, заключено большое количество биологически активных веществ: витаминов С, D, К, Е, А, В<sub>2</sub> и Р, каротина, хлорофилла, эфирных масел, пантотеновой и бензойной кислот, а также других, что делает ДЗ не менее значимой, чем собственно сама древесина. На территории страны произрастают многочисленные леса различных хвойных пород: сосны (обыкновенной, приморской, сибирской и др.), лиственницы (сибирской, Сукачева, даурской, европейской и др.), пихты (сибирской, белокорой, кавказской и др.), ели (обыкновенной, аянской, сибирской и др.), кедра (сибирского, корейского, канадского, аляскинского и др.), стланика (кедрового, соснового) и др. Достижения отечественной и зарубежной науки, а также практика рационального получения и эффективного использования ДЗ свидетельствуют о целесообразности

и экономической обоснованности ее более широкого внедрения в народном хозяйстве страны [1, 2, 3].

В общем случае технологический процесс получения ДЗ включает следующие основные операции: сбор, отделение, очистку и сортировку. К настоящему времени разработано и используется большое количество разнообразного промышленного оборудования для получения ДЗ. В то же время все еще не удалось полностью механизировать и автоматизировать этот технологический процесс вследствие крайне несовершенной важнейшей его операции – отделения ДЗ от ветвей. К достаточно хорошо разработанным и апробированным на практике относят такие возможные способы отделения ДЗ, как механический, термический, химический, вакуумный, криогенный и комбинированные. Однако наибольшее практическое применение получил механический способ, как наименее энергозатратный и простой в исполнении. Принцип работы существующих промышленных установок по этому способу основан на механическом воздействии на ДЗ с помощью различных по типу и конструкции рабочих органов. Существенными недостатками этого способа являются невозможность исключения травмирования ДЗ и высокая загрязненность нежелательными примесями при ее отделении от ветвей, вследствие чего неоправданно снижаются

потребительские свойства конечного сырья. По этим причинам в настоящее время проблема промышленного получения высококачественной ДЗ все еще остается актуальной [1, 4].

С целью решения обозначенной проблемы учеными ВГЛТУ были выполнены исследования по разработке технологии и оборудования для получения высококачественной ДЗ перспективным способом, основанным на использовании энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля. В его основе лежит трансформация энергии электромагнитного поля СВЧ в теплоту, которая инициируется непосредственно внутри обрабатываемого диэлектрического материала по всему его объему, практически независимо от конфигурации последнего. Основное преимущество этого способа по сравнению с известным термическим способом, основанным на передаче теплоты в материал путем теплопроводности, – возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый объект, а также высокий КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, близкий к 100 %. По данным результатов различных исследователей, с помощью СВЧ-нагрева возможно достижение отделения хвои в объеме 90-95 % без дополнительной механической обработки. Кроме этого, было установлено, что воздействие СВЧ-энергии одновременно приводит к обеззараживанию хвои, значительно увеличивающему сроки ее хранения [5, 6, 7].

Принципиальная схема предложенной конструкции установки для отделения хвои СВЧ-нагревом представлена на рис. 1. Установка работает следующим образом. Хвойные лапки загружаются в бункер 1, после чего они при помощи вертикального поршня 7 подающего механизма проталкиваются в приемную камеру 2. Подпрессовывающий механизм незначительно уплотняет подаваемый материал и парциально проталкивает его горизонтальным поршнем 8 во вращающийся барабан 3, выполненный из диэлектрического материала. Оба поршня 7 и 8 механизмов подачи хвои в приемную камеру 2 приводятся в движение синхронно с помощью шатунов 9, 10 и кривошипов 11, 12 от соответствующего привода (на рисунке не показано).

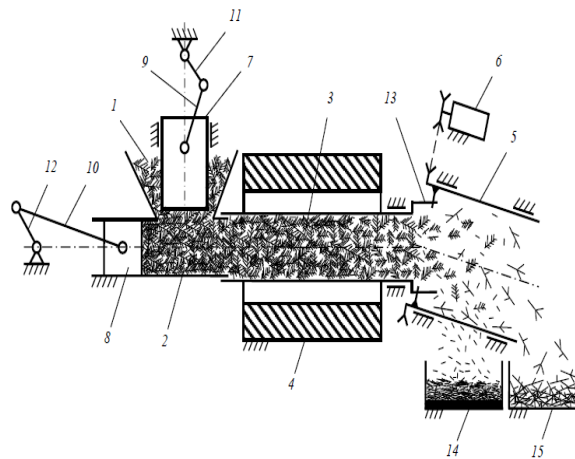


Рис. 1. Принципиальная схема установки для отделения хвои СВЧ-нагревом

Для обеспечения полноценного СВЧ-нагрева хвойных лапок барабан 3 вращается в камере 4 с заданной частотой, приводимый приводом 6 и цепочного зацепления 13. Обработанные СВЧ-нагревом хвойные лапки непрерывно выталкиваются через выходной патрубок в сепаратор 5, где при вращении они интенсивно контактируют со стенками сепаратора и друг с другом, в результате чего происходит процесс доотделения хвои. При этом на периферийной части сепаратора 5 выполнены просечки прямоугольной формы, размеры которых в 1,2-1,5 раза превышают размеры хвоинок.

Готовая хвоя через просечки сепаратора, а оголенные ветки через открытый его торец попадают в соответствующие приемные лотки 14 и 15. Выделяющаяся при нагреве ДЗ влага из вращающегося барабана 3 через выполненные в нем специальные отверстия поступает в камеру СВЧ-нагрева 4, а оттуда с помощью принудительной вентиляции (на рисунке не показано) выносится во внешнюю среду [8].

Важной подготовительной операцией, предшествующей непосредственному отделению хвои в установке СВЧ-нагревом, является заготовка хвойных лапок длиной до 10-15 см.



Рис. 2. Хвойные лапки различных пород деревьев – а и хвоя после отделения и очистки – б

Вследствие большого разнообразия деревьев хвойных пород, заготавливаемые лапки существенно отличаются между собой по таким показателям, как количество ветвей (одно- и многоветвевые) и их размерам (длине и диаметру), размерам хвоинок (длине, ширине, толщине) и форме их сечения (квадратные, треугольные, круглые, плоско-выпуклые, эллипсовидные), количеству хвоинок в побеге или на ветви (одно-пяти-игольчатые, пучковые) и др. (рис. 2, а). Такие отличия хвойных лапок важно учитывать при обосновании как основных геометрических параметров агрегатов и узлов, так и необходимой мощности установки на СВЧ процесс обработки. В действующем в настоящее время государственном стандарте к качеству хвои, получаемой после операции отделения (рис. 2, б), предъявляется ряд требований [9]. В частности, в зависимости от содержания коры, хвои, листьев, древесины, неорганических и органических примесей ДЗ подразделяют на три сорта в соответствии с табл. 1. Из таблицы следует, что величина суммарной доли примесей допускается значительной по величине и составляет 20-40 %. Такие нежесткие требования стандарта объясняются в основном тем, что существующие промышленные технологии и применяемое оборудование для отделения и очистки ДЗ все еще крайне несовершенны и не в состоянии обеспе-

чить получение высококачественной хвои с чистотой в пределах 90-95 %. Лежащий в основе традиционной технологии механический способ отделения ДЗ ведет не только к большой засоренности различными вредными примесями конечного продукта, но и к значительному дроблению и травмированию хвои, а следовательно, к снижению полезных свойств и быстрой ее порче. Вследствие этого стандарт ввел жесткие сроки хранения получаемой хвои, составляющие всего сутки при плюсовых и пятеро суток – при минусовых температурах. Все это неоправданно ограничивает широкое применение ДЗ в народном хозяйстве.

Важным технологическим свойством ДЗ является распределение влаги в хвойной лапке, которое существенно изменяется в течение года. Средние показатели распределения влаги, полученные экспериментально для хвойных лапок различных пород с диаметром веток 6-8 мм, представлены в табл. 2 [10].

Данные таблицы показывают, что большую часть влаги, содержащейся в хвойной лапке, включает в себе хвоя (30-50 %). При этом максимальная влажность хвои наблюдается в июле-августе, а минимальная – в мае-июне. Динамика влажности хвои коррелирует также с местом произрастания леса, почвенно-геологическими условиями,

количеством осадков в течение года и рядом других факторов, которые необходимо учитывать при заготовке ДЗ. Это тем более важно вследствие того, что качество СВЧ процесса отделения хвои от ветвей напрямую зависит от степени насыщенности влагой как самой хвои, так и коры и древесины ветвей. Известно, что процесс отделения хвои основан на потере механической связи хвоинок с древесной ветвью при естественном усыхании хвойных лапок. При этом, как показывают результаты исследований, значительно более быстрое по сравнению с хвоей в естественных условиях искусственное обезвоживание поверхностного слоя древесины и коры способствует ускорению самоотделения хвои без существенного ухудшения ее потребительских свойств [6].

С целью изучения закономерностей процесса отделения хвои способом СВЧ-нагрева и определения на этой основе оптимальных значений основных рабочих и конструктивных параметров проектируемой установки было выполнено соответствующее математическое моделирование. Ставилась задача получения следующих рабочих пара-

метров установки СВЧ-нагрева: потребляемая мощность при заданном объеме рабочей камеры и степени отделения хвои от ветвей, плотность хвойных лапок в рабочей камере, продолжительность процесса, количество отводимой влаги. В качестве основных конструктивных параметров установки рассматривались следующие (см. рис. 1): размеры рабочей камеры и сепаратора, величины вертикальной и горизонтальной скоростей подачи поршнями загружаемых хвойных лапок в приемную камеру, частота вращения барабана и сепаратора.

В основу математического моделирования были положены известные положения и методики теории тепло- и массообмена, широко используемые при исследовании диэлектрических материалов и биологических объектов. Одной из особенностей моделирования операции СВЧ-нагрева ДЗ является необходимость учета ряда важных особенностей, присущих биологическим объектам, что существенно усложняет получение необходимых зависимостей, которые бы наиболее адекватно соответствовали реальному процессу.

Таблица 1

Массовые доли составляющих древесной зелени в зависимости от ее сорта

Наименование показателя	Норма для сорта		
	1-го	2-го	3-го
Массовая доля хвои, листьев, почек и неодревесневших побегов, %, не менее	80	70	60
Массовая доля коры и древесины, %, не более	15	25	35
Массовая доля других органических примесей, %, не более	5	5	5
Массовая доля неорганических примесей, %, не более	0,2	0,2	0,2
Примечания:			
1. К другим органическим примесям относят: мох, лишайник, травянистые растения, семена и другие примеси растительного происхождения.			
2. К неодревесневшим относят побеги текущего года вегетации в течение не более 3 мес. с начала вегетационного периода.			

Таблица 2

Распределение влаги в хвойной лапке кедра, ели и пихты

Древесная порода	Распределение влаги, %			
	в хвойной лапке	в хвое	в коре	в древесине
Кедр корейский	100	37,00	31,20	31,80
Ель аянская	100	45,70	20,40	33,90
Пихта белокорая	100	53,03	25,28	21,69

Достаточно полно описывают процесс тепло- и массообмена для СВЧ-нагрева хвойных лапок системы дифференциальных уравнений, представленных в известных работах [11, 12] для случаев сушки диэлектрических материалов в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_m s_m \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \varepsilon_\phi \frac{\partial u}{\partial t}, \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \varepsilon_\phi \frac{r}{c_T} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} + q_v \frac{1}{c_T \rho_0}, \\ \frac{\partial z}{\partial t} = a_p \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \varepsilon_\phi \frac{\rho_0}{b \cdot m_{II}} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u$ ,  $t$ ,  $z$ ,  $\tau$  – соответственно локальное по координате  $x$  влагосодержание, температура материала и давление пара в его порах и капиллярах;

$a_m$  – коэффициент потенциала проводимости переноса жидкости;

$s_m$  – термоградиентный коэффициент;

$\varepsilon_\phi$  – критерий фазового превращения;

$a_p$  – коэффициент конвективной диффузии;

$m_p$  – пористость тела;

$b = d\rho_B/dz$  – кинетический коэффициент;

$c_T$  – удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·К);

$\rho_B$  – плотность влажного воздуха в порах и капиллярах, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – плотность абсолютно сухого тела, кг/м<sup>3</sup>;

$a_T$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$q_v$  – удельная мощность тепловых потерь при СВЧ воздействии, Вт/К.

Решение системы уравнений (1) затруднено из-за того, что не удается сформулировать начальные и граничные условия, так как кинетические коэффициенты  $a_m$ ,  $s_m$ ,  $a_T$ ,  $a_p$  известны лишь для очень ограниченного числа материалов и отсутствуют для ДЗ. В этой связи, принимая во внимание, что градиенты температуры и влагосодержания практически не оказывают влияния на интенсивность процесса нагрева ДЗ, систему уравнений (1) можно упростить следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} = -\frac{q_v(\bar{u})}{r\rho_0}, \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial \bar{t}}{\partial \tau} = \frac{q_v(\bar{t})}{c_T\rho_0}, \\ \frac{\partial z}{\partial t} = a_p \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \varepsilon_\phi \frac{1}{c_B} \cdot \frac{q_v(\bar{t}, \bar{u})}{r\rho_0}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $c_B = m_p \cdot b / \rho_0$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К).

Система уравнений (2), с учетом особенностей механизма сушки с использованием внутренних источников тепла, может быть взята за основу при составлении математической модели и исследования процесса обработки ДЗ в поле СВЧ. При этом необходимо учитывать распределенность параметров хвойных лапок по всему объему камеры СВЧ-нагрева.

При математическом моделировании процесс нагрева хвойных лапок в СВЧ-камере рассматриваем в установке лучевого типа с ограниченным объемом камеры СВЧ-нагрева и волноводом, расположенным на боковой стенке камеры. В этом случае стенки камеры позволяют рассеивать СВЧ энергию достаточно равномерно по всему ее рабочему объему. Для интенсификации процесса сушки и предотвращения конденсации пара на внутренних стенках камеры она снабжена вентиляционными отверстиями и принудительной вентиляцией

Для моделирования процесса СВЧ-нагрева воспользуемся одномерными моделями [13] и на основе этого запишем систему уравнений тепло-массообмена для случая нагрева в установившемся режиме в виде

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dz} + \frac{2h_u}{c_d \rho_d} \frac{dv}{dv} = \frac{q_v}{c_d \rho_d v}, \\ \frac{dm}{dz} = -\frac{2h_u a}{rv} \theta, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\theta = T - T_c$  – разница между температурой обрабатываемого слоя  $T$  и окружающей средой  $T_c$ , °С;

$h_u$  – коэффициент теплоотдачи испарением;

$r$  – теплота парообразования, кДж;

$a$ ,  $d$  – ширина и толщина слоя, м;

$m$  – поглощенное количество жидкости, испаренной из слоя, кг;

$v$  – скорость движения обрабатываемого материала в поле СВЧ, м/с;

$z$  – координата в направлении движения материала.

В общем случае энергия подводится электромагнитным полем к обрабатываемому вороху хвойных лапок в СВЧ камере (слою) к верхней и нижней его поверхностям и, соответственно, потери тепла происходят за счет испарения влаги с этих поверхностей. Пренебрегая испарением по боковым поверхностям слоя из-за ее незначительной величины, получим следующее решение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \exp \left[ - \int_0^z p(z) dz \right] \left\{ \int_0^z Q(z) dz + \theta_{нач} \right\}, \\ p(z) = \frac{2h_u}{c_o \rho_o v}, \\ Q(z) = \frac{q_v}{c_o \rho_o v}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\theta_{нач}$  – превышение температуры объекта над температурой окружающей среды (на входе в СВЧ-камеру);

$Q$  – количество поглощаемого материалом тепла, Вт/см<sup>3</sup>.

Второе уравнение системы (3), с учетом начального  $m_{нач}$  и конечного  $m_{кон}$  количества жидкости при испарении из слоя, можно представить как

$$\Delta m = m_{нач} - m_{кон} = \frac{2a}{rv} \int_0^z h_u \theta dz. \quad (5)$$

Величина  $h_u$  находится из следующего соотношения:

$$h_u = \frac{r h_m \cdot (\rho_{пс} - \rho_{по})}{\theta}, \quad (6)$$

где  $h_m$  – коэффициент массоотдачи;

$\rho_{пс}$ ,  $\rho_{по}$  – плотность пара, соответствующая температуре насыщения и в окружающей среде, кг/м<sup>3</sup>.

Удельную мощность потерь энергии ( $q_v$ ) в результате сушки с достаточной степенью точности можно определить из следующего выражения [14]:

$$q_v = \frac{N \cdot P_r}{\eta \cdot a \cdot d \cdot L}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество волноводных излучателей, расположенных на стенке рабочей камеры, ед.;

$P_r$  – мощность одного СВЧ-генератора, кВт;

$\eta$  – КПД СВЧ-генератора;

$a$ ,  $d$  – ширина и толщина слоя, м;

$L$  – длина волновода, м.

Таким образом, предложенные зависимости позволяют определить характер изменения влагосодержания материала от температуры, а также потери электрической мощности установки на испарение влаги из обрабатываемой ДЗ.

Для дальнейшей конкретизации и математического моделирования процесса СВЧ-нагрева при отделении ДЗ учитываем следующие основные допущения и особенности протекания процесса:

1. СВЧ-нагрев способствует резкой интенсификации процессов тепло- и массообмена, так как нагрев происходит по всему объему материала, причем градиенты температуры и влажности совпадают по направлению [11]. По мере изменения в процессе сушки геометрических размеров, структуры, температуры и влажности материала диэлектрические свойства материала могут существенно меняться.

2. В процессе сушки влагосодержание материала уменьшается, вначале скорость сушки быстро увеличивается, затем, начиная с некоторой критической точки, она уменьшается и при достижении равновесного влагосодержания становится равной нулю [11].

3. Высушенное ядро материала – его внутренняя часть – сильно разогревается, и при дальнейшем воздействии СВЧ-энергией органические материалы перегреваются, вплоть до возгорания. Чтобы не происходило разрушения полезных свойств материала, необходимо осуществлять процесс нагрева до достижения определенной величины влажности [12].

4. При моделировании процесса СВЧ-нагрева учитываем также различия в поглощении электромагнитной энергии различными составляющими влажного материала – сухим веществом, влагой, паром [14].

5. Для моделирования процесса сушки ДЗ в поле СВЧ будем условно рассматривать ее как однородный материал с одинаковыми по всему обрабатываемому объему электрофизическими свойствами.

Тогда, исходя из принятых допущений, для зоны действия СВЧ, согласно [11], удельная мощность тепловых потерь  $P_{уд}$  может быть с достаточной степенью точности найдена из следующего выражения:

$$P_{уд} = 0,278 \cdot 10^{-2} \cdot f \varepsilon' \operatorname{tg} \delta E^2, \quad (8)$$

где  $f$  – частота электромагнитных колебаний, Гц;

$\varepsilon'$  – диэлектрическая проницаемость хвои, Ф/м;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь, %;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м.

В рассматриваемом процессе сушки СВЧ-нагревом считаем, что высота слоя обрабатываемого материала сравнительно мала, пористость его высока и поэтому с высокой степенью достоверности можно считать, что напряженность СВЧ поля  $E$  постоянна по всему объему материала и электромагнитные волны не затухают при прохождении сквозь него.

Поскольку в процессе сушки диэлектрические свойства материалов могут сильно меняться, необходимо учитывать эти изменения через коэффициент диэлектрических потерь  $\varepsilon''$ , значение которого должно определяться с учетом температуры, состава материала и др. условий в каждой конкретной точке объекта сушки [14]. Будем считать, что обрабатываемый материал состоит из сухого вещества, воды и пара, а суммарная величина диэлектрических потерь определяется из выражения как

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_c + \varepsilon''_в + \varepsilon''_п, \quad (9)$$

где  $\varepsilon''_c$ ,  $\varepsilon''_в$  и  $\varepsilon''_п$  – значения диэлектрических потерь сухого вещества, влажного вещества и пара соответственно.

Учитывая, что пар практически не поглощает энергию электромагнитного поля, т. е.  $\varepsilon''_п = 0$ , то  $\varepsilon''_в$  и  $\varepsilon''_c$ , в соответствии с рекомендациями [15, 16], можно представить в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} \varepsilon''_c &= \frac{m_s \cdot c_s \cdot (T_s - T_0)}{a \cdot E^2 \cdot V_c \cdot t_c}, \\ \varepsilon''_в &= \varepsilon''_c \frac{m_c \cdot c_c \cdot (T_c - T_0) \cdot V_s \cdot t_s}{c_s \cdot m_s \cdot (T_s - T_0) \cdot V_c \cdot t_c}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности;  $V_c, V_s$  – объемы сухого материала и воды, м<sup>3</sup>;  $m_c, m_s$  – масса сухого материала и воды, кг;  $T_0$  – начальная температура, °С;  $T_c, T_s$  – конечная температура сухого материала и воды, °С;

$c_c, c_s$  – удельная теплоемкость сухого материала и воды, кДж/(кг·К);

$t_c, t_s$  – время обработки сухого материала и воды, с.

Тогда окончательно коэффициент  $\varepsilon''$  можно определить из выражения

$$\begin{aligned} \varepsilon'' &= \frac{m_s \cdot c_s \cdot (T_s - T_0)}{a \cdot E^2 \cdot V_c \cdot t_c} + \\ &+ \varepsilon''_c \frac{m_c \cdot c_c \cdot (T_c - T_0) \cdot V_s \cdot t_s}{c_s \cdot m_s \cdot (T_s - T_0) \cdot V_c \cdot t_c}. \end{aligned} \quad (11)$$

Так как диэлектрические свойства воды хорошо изучены, данную формулу можно преобразовать, если представить отдельно свойства сухого вещества в виде электрофизических свойств древесины и хвои, входящих в ДЗ. Таким образом, выражение (11) позволяет учесть изменение свойств ДЗ в процессе СВЧ-сушки, для чего необходимо опытным путем исследовать основные физические характеристики для конкретной породы хвойного дерева.

Результаты анализа состояния теоретических и практических аспектов проблемы получения высококачественной ДЗ хвойных пород, а также предложенные аналитические зависимости по обоснованию основных рабочих и конструктивных параметров предложенной установки для отделения хвои СВЧ-нагревом позволили сделать следующие основные выводы:

– в общей биомассе леса доля ДЗ составляет 3-5 %, из которой доступно в весовом выражении к применению не менее 5 млн т в год и которая в настоящее время полезно практически не используется;



– ДЗ является ценным сырьем для многих отраслей промышленности, таких как: комбикормовой, мыловарения, косметической, птицеводства, животноводства, звероводства, фармацевтической, пищевой, химической, парфюмерной, медицинской;

– химический состав хвои включает в себя следующие ценные вещества: витамины, каротин, протеин, аминокислоты, хлорофилл, эфирные масла, ферменты, антимикробные вещества, белки, жиры, углеводы, макро- и микроэлементы, органические кислоты, сырую клетчатку, крахмал, сахара и др.;

– качество хвои определяется ее чистотой, свежестью, степенью механической поврежденности и зараженностью различными болезнетворными микроорганизмами, грибами и гнилью;

– ДЗ является ценным возобновляемым и экологически чистым продуктом, безвозвратно теряемым в настоящее время при заготовках леса, и поэтому ее использование в промышленных масштабах является целесообразным и экономически оправданным;

– существующие промышленные способы отделения ДЗ хвойных пород все еще не находят широкого применения, так как допускают недопустимо высокую загрязненность различными вредными примесями, достигающую в зависимости от породы деревьев 20-40 %, тогда как в высококачественной хвое этот показатель не должен превышать 5-10 %;

– наиболее эффективным способом получения высококачественной хвои является способ СВЧ-нагрева, обеспечивающий ее отделение от ветвей без механических повреждений, допускающий наличие примесей не более 5 %, сохраняющий ценные потребительские качества конечного продукта с его одновременным обеззараживанием;

– с учетом принятых допущений и особенностей протекания процесса были получены аналитические зависимости для исследования режимов работы и определения основных рабочих и конструктивных параметров предлагаемой конструкции установки для отделения хвои способом СВЧ-нагрева.

### Библиографический список

1. Иевинь, И. К. Древесная зелень – ценное сырье [Текст] / И. К. Иевинь, М. О. Даугавиетис, А. П. Родинекс // Лесная промышленность. – 1986. – № 2. – С. 30-31.
2. Селиванов, Н. В. Безотходная технология лесозаготовок [Текст] / Н. В. Селиванов, Л. А. Занегин // Лесная промышленность. – 1990. – № 4. – С. 23.
3. Никишов, В. Д. Комплексное использование древесины [Текст] : учеб. / В. Д. Никишов. – М. : Лесн. пром-сть, 1985. – 264 с.
4. Jung, K. Y. Luminescence comparison of yag:ce phosphors prepared by microwave heating and precipitation methods [Text] / K. Y. Jung, Y. C. Kang // Physica B: Condensed Matter. – 2010. – Issue 405. – № 6. – P. 1615-1618.
5. Preparation of nanocrystalline ceria particles by sonochemical and microwave assisted heating methods [Text] / H. Wang [et al.] // PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics. – 2002. – Issue 4. – № 15. – P. 3794-3799.
6. Торговников, Г. И. Сверхвысокочастотный способ обработки древесной зелени [Текст] / Г. И. Торговников, Т. В. Минакова // Лесной журнал. – 1983. – № 2. – С. 53-55.
7. Посметьев, В. И. К обоснованию критерия эффективности отделения древесной зелени [Текст] / В. И. Посметьев, О. С. Калашникова // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2006. – № 5-2. – С. 133-134.
8. Патент на изобретение 2308827РФ, МПК А01G23/00. Способ обработки древесной зелени и устройство для его осуществления [Текст] / В. И. Посметьев, О. С. Калашникова, Л. Т. Свиридов, Т. В. Посметьева ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "ВГЛТА". – № 2006106075/12 ; заявл: 26.02.2006 ; опубл. 27.10.2007.
9. ГОСТ 21769-84. Зелень древесная. Технические условия [Текст]. – Введ. 1984. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.

10. Томчук, Р. И. Древесная зелень и ее использование [Текст] / Р. И. Томчук, Г. Н. Томчук. – М. : Лесн. пром-сть, 1966. – 237 с.
11. Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
12. Долгополов, Н. Н. Электрофизические методы в технологии строительных материалов [Текст] / Н. Н. Долгополов. – М. : Госэнергоиздат, 1971. – 231 с.
13. Архангельский, Ю. С. Расчет процесса сушки овощей в СВЧ установке методического типа [Текст] / Ю. С. Архангельский, С. В. Тригорный // Электротехнологические СВЧ установки : межвуз. сб. науч. тр. – Саратов, 2000. – С. 9-13.
14. Рогов, И. А. Физические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И. А. Рогов. – М. : Пищевая пром-сть, 1974. – 584 с.
15. Астафьев, В. Н. Измерение диэлектрических свойств обрабатываемых материалов с помощью бытовой СВЧ печи [Текст] / В. Н. Астафьев // Электротехнологические СВЧ установки: межвуз. сб. науч. тр. – Саратов, 2000. – С. 25-29.
16. Christopoulos, C. The application of time-domain numerical simulation methods to the microwave heating of foods [Text] / C. Christopoulos // IMA Journal Management Mathematics. – 1993. – Issue 5. – № 1. – P. 385.

### References

1. Ievin I. K., Daugavietis M. O., Rodineks A. P. *Drevesnaja zelen – cennoe syre* [Woody greens - valuable raw materials] *Lesnaja promyshlennost* [Forest Industry], 1986, no. 2, pp. 30-31. (In Russian)
2. Selivanov N. V., Zanegin L. A. *Bezothodnaja tehnologija lesozagotovok* [Waste-free technology of logging] *Lesnaja promyshlennost* [Forest Industry], 1990, no. 4, p. 23. (In Russian)
3. Nikishov V. D. *Kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny* [Complex use of wood: Textbook for high schools]. Moscow, 1985, 264 p. (In Russian)
4. Jung K.Y., Kang Y.C. Luminescence comparison of yag:ce phosphors prepared by microwave heating and precipitation methods. *Physica B: Condensed Matter*. 2010, Issue 405, no. 6, pp. 1615-1618.
5. Wang H., Zhu J.-J., Zhu J.-M., Liao X.-H., Xu S., Ding T., Chen H.-Y. Preparation of nanocrystalline ceria particles by sonochemical and microwave assisted heating methods. *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*. 2002, Issue 4, no. 15, pp. 3794-3799.
6. Torgovnikov G. I., Minakova T. V. *Sverhvisokochastotnyj sposob obrabotki drevesnoj zeleni* [Superhigh-frequency treatment of woody greens] *Lesnoj zhurnal*. [Forest Journal], 1983, no. 2, pp. 53-55. (In Russian)
7. Posmetev V. I., Kalashnikova O. S. *K obosnovaniju kriterija jeffektivnosti otdelenija drevesnoj zeleni* [To the validation of the criterion of the efficiency of the separation of woody greens]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija : Tehnicheskie nauki*. [Bulletin of Kurgan State University. Series: Engineering], 2006, no. 5-2, pp. 133-134. (In Russian)
8. Posmetev V. I., Kalashnikova O. S., Sviridov L. T., Posmeteva T. V. *Sposob obrabotki drevesnoj zeleni i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* [A way of processing woody greens and the device for its implementation]. Patent RFno. 2308827.
9. *GOST 21769-84. Zelen drevesnaja. Tehnicheskie uslovija*. [Standart 21769-84. The greens are drawn. Technical conditions]. Moscow, 1984, 7 p. (In Russian)
10. Tomchuk R. I., Tomchuk G. N. *Drevesnaja zelen' i ee ispolzovanie* [Woody greens and its use]. Moscow, 1966, 237 p. (In Russian)
11. Lykov A. V. *Teorija sushki* [The theory of drying]. Moscow, 1968, 472 p. (In Russian)
12. Dolgoplov N. N. *Jelektrofizicheskie metody v tehnologii stroitel'nyh materialov* [Electrophysical methods in the technology of building materials]. Moscow, 1971, 231 p. (In Russian)
13. Arhangel'skij Ju. S., Trigornij S. V. *Raschet processa sushki ovoshhej v SVCh ustanovke metodicheskogo tipa* [Calculation of the process of vegetable drying in microwave equipment of a methodical type] *Mezhvuz. nauchn. sb. Jelektrotehnologicheskie SVCh ustanovki* [Interuniversity. scientific. Sat. Electro-technological microwave installa-

tions]. 2000, pp. 9-13. (In Russian)

14. Rogov I. A. *Fizicheskie metody obrabotki pishhevyyh produktov* [Physical methods of processing food products] Moscow, 1974, 584 p. (In Russian)

15. Astafev V. N. *Izmerenie dijelektricheskikh svoystv obrabatyvaemykh materialov s pomoshh'ju bytovoj SVCh pechi* [Measurement of Dielectric Properties of Processed Materials Using a Household Microwave Oven] *Mezhvuz. sb. nauchn. trudov «Jelektrotehnologicheskie SVCh ustanovki»*. [Interuniversity. Sat. scientific. works "Electro-technological microwave installations"], 2000, pp. 25-29. (In Russian).

16. Christopoulos C. The application of time-domain numerical simulation methods to the microwave heating of foods. *IMA Journal Management Mathematics*. 1993, Issue 5, no. 1, p. 385.

### Сведения об авторах

*Посметьев Валерий Иванович* – профессор кафедры производства эксплуатации и ремонта машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: posmetyev@mail.ru.

*Латышева Маргарита Александровна* – доцент кафедры производства эксплуатации и ремонта машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: lrita@bk.ru.

### Information about authors

*Posmetev Valery Ivanovich* – Professor of Production, Maintenance and Repair of Machines department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", DSc. in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru.

*Latysheva Margarita Alexandrovna* – Associate Professor of Production, Maintenance and Repair of Machines department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", DSc. in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: lrita@bk.ru.