

6. Гирин, О. Б. Образование эвтектик при электрокристаллизации металлических сплавов [Текст] / О. Б. Гирин, А. П. Клименко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 6. – С. 15–17.
7. Гирин, О. Б. Карбидообразование в электроосаждаемых металлах, легированных углеродом [Текст] / О. Б. Гирин, М. Т. Величко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 5. – С. 18–21.
8. Гирин, О. Б. Формирование интерметаллидов в металлических сплавах при электрохимической кристаллизации [Текст] / О. Б. Гирин, И. Д. Захаров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4. – С. 63–65.
9. Гирин, О. Б. Взаимная диффузия атомов олова и железа в процессе электрохимического осаждения олова на железную основу [Текст] / О. Б. Гирин, Е. В. Колесник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 2. – С. 46–49.
10. Виткин, А. И. Основы теории и технология производства белой жести [Текст] / А. И. Виткин, Д. П. Галкин, Б. И. Берлин. – М. : Металлургия, 1978. – 392 с.
11. Morgan, E. Tinplate and Modern Canmaking Technology [Text] / E. Morgan. – Oxford : Pergamon Press, 1985. – 268 p.
12. Хейкер, Д. М. Рентгеновская дифрактометрия [Текст] / Д. М. Хейкер, Л. С. Зевин. – М. : Физматгиз, 1963. – 380 с.
13. Vertes, A. Mossbauer Study of Interphase Formation at the Interface of the Electrodeposited Tin Layer and Iron Substrate [Text] / A. Vertes, S. Nagy, M. Z. Awad // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. – 1982. – Vol. 199, №1-2. – P. 367–369.
14. Кудрявцев, Ю. Д. Исследование переходного слоя железо-хром при электролитическом нанесении хромовых покрытий [Текст] / Ю. Д. Кудрявцев, Д. П. Семченко, А. Г. Пилипенко, Л. Н. Новиченко, П. А. Мыщик, А. И. Виткин // Электрохимия. – 1974. – Т. 10, №3. – С. 395–397.

*Створення технологій сушіння вовни за допомогою електромагнітних полів надвисокої частоти неможливе без знання фізичних параметрів вологою вовни, особливо її діелектричної проникності*

*Ключові слова: діелектрична проникність, волога вовна, електромагнітні поля*

*Создание технологий сушки шерсти с помощью электромагнитных полей сверхвысокой частоты невозможно без знания физических параметров влажной шерсти, в особенности ее диэлектрической проницаемости*

*Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажная шерсть, электромагнитные поля*

*Creating hair-drying technology using ultra-high frequency electromagnetic fields is impossible without knowledge of the physical parameters of raw wet wool, in particular the dielectric constant*

*Key words: dielectric constant, raw wet wool, electromagnetic fields*

УДК 677.027.162.537

# АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СУШКИ ШЕРСТИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

**И. В. Руженцев**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Кафедра метрологии и измерительной техники  
Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61016

Контактный тел.: (057) 702-13-31

## 1. Введение

Повышение конкурентоспособности продукции предприятий текстильной промышленности Украины, возможно как за счет улучшения потребительских свойств продукции, так и за счет снижения ее себестоимости. Значительную часть в себестоимости шерстной продукции составляет сырье, себестоимость которого существенно зависит от ее сушки при первичной

обработке. Существующие технологии, основанные на конвективном способе сушки, обладают значительными недостатками такими как ухудшение природных свойств шерсти и значительное энергопотребление.

Наиболее перспективным способом сушки шерсти является электромагнитная сушка с использованием высокочастотных электромагнитных полей (ЭМП) ввиду ряда таких положительных качеств: небольшое энергопотребление, экологическая чистота производ-

ства, сохранение природных свойств шерсти. В тоже время применение разработанных технологий сушки веществ с использованием ЭМП требует дальнейших исследований для определения диэлектрических свойств шерсти.

## 2. Анализ последних исследований и публикаций

Сушка шерсти с помощью высокочастотных электромагнитных полей целесообразна при влажности шерсти не более 60%, при большей влажности значительно увеличивается необходимое количество энергии для испарения влаги [1] и энергоэффективность сушки значительно снижается.

Теоретический анализ процесса сушки шерсти с помощью электромагнитных полей сверхвысокой частоты показал, что процесс сушки существенно зависит от поглощения энергии влагой, находящейся между волокнами шерсти, возникновения конвективного потока и скорости фильтрации парожидкостной среды в объеме шерсти [2].

## 3. Основные материалы исследований

Метод сушки с использованием ЭМП сверхвысоких частот (СВЧ) основан на воздействии на материал интенсивного электромагнитного поля. Под действием СВЧ поля молекулы воды (диполи) начинают совершать колебательные и вращательные движения, ориентируясь с частотой поля по его электрическим линиям. Движение молекул превращается в тепловую энергию. Чем больше воды в объеме шерсти материала, чем больше молекул участвует в этом движении, тем больше тепловой энергии выделяется. Таким образом, разогрев происходит во всем объеме шерсти, причем более влажные участки получают больше энергии. За счет этого происходит удаление влаги, сушка шерсти и, одновременно, выравнивание влажности во всем объеме. Энергия СВЧ электромагнитных полей в основном расходуется на создание условий, интенсифицирующих перенос влаги из глубинных слоев к поверхностям.

На основе теории мультимолекулярной адсорбции система шерсть-вода представляется состоящей из трех компонентов: шерсть, связанная вода и подвижная вода [2]. Соответственно, диэлектрическая постоянная связанной воды остается неизменной в широком диапазоне частот и равна диэлектрической постоянной объемной воды.

Диэлектрические свойства материалов описываются комплексной диэлектрической проницаемостью [3]:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

где  $\epsilon'$  – диэлектрическая постоянная;  
 $\epsilon''$  – диэлектрические потери.

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  характеризует способность диэлектрика накапливать энергию, а мнимая  $\epsilon''$  характеризует способность диэлектрика рассеивать энергию в веществе.

$$\epsilon'' = \epsilon''_k x_k + \epsilon''_l x_l + \epsilon''_m x_m \quad (2)$$

где  $x_i$  – грамм-молекула компоненты вещества, индекс  $k$  относится к шерсти,  $l$  – связанной воде,  $m$  – подвижной воде.

Экспериментальные исследования показали, что диэлектрические потери влажной шерсти определяются диэлектрическими потерями обычной воды на высоких частотах и в диапазоне температуры от 25 до 95°C величина  $\epsilon'$  не имеет значительной зависимости от влажности и ее значение от 6 до 8 единиц при влажности 30%, а значение величины  $\epsilon''$  находится в пределах от 0,6 до 1,5 [4].

Количество тепла, выделяемое при СВЧ-нагреве в единице объема материала, рассчитывается по закону Джоуля-Ленца [5]

$$Q = 0,278 \cdot 10^{-10} \cdot \epsilon' \cdot \text{tg}\delta \cdot f \cdot E^2 \quad (3)$$

где  $\epsilon'$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости материала;

$\delta$  – угол диэлектрических потерь;

$f$  – частота электромагнитного поля, Гц;

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

Таким образом, нагрев диэлектрических материалов в ЭМП СВЧ определяется как диэлектрическими свойствами материала  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$ , так и параметрами электромагнитного поля – напряженностью  $E$  и частотой  $f$ .

Под действием электрических полей СВЧ в волокнистом материале возникает сложное взаимодействие между полями температуры, влагосодержания и давления, влияющие на массоперенос и выделение тепла. Общее уравнение, характеризующее закон перемещения влаги в материале в процессе высокочастотной сушки, имеет вид [6]

$$q_m = -a_m \rho_0 \nabla u - a_m \rho_0 \delta \nabla t - k_p \nabla p \quad (4)$$

где  $\nabla u, \nabla t, \nabla p$  – соответственно градиенты влагосодержания, температуры и давления;

$a_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;

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

$k_p$  – коэффициент фильтрации.

При интенсивном подводе тепла происходит бурное испарение влаги, вызывающее рост давления внутри слоя волокнистого материала, подвергающегося сушке. Возникающий при этом градиент давления способствует образованию мощного потока влаги, направленного к поверхностным слоям. Влияние градиентов  $\nabla u$  и  $\nabla t$  в этом случае будет незначительным по сравнению с влагопереносом, который определяется градиентом давления  $\nabla p$ .

Поглощение электромагнитной энергии влажной шерстью приводит к повышению ее температуры и возникновению избыточного давления пара, приводящего к конвективному массопереносу. Фильтрационный поток определяется по формуле Дарси [2]

$$i = V\rho = -k_c \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5)$$

где  $V$  – скорость фильтрации парожидкостной среды, м/с;

$\rho$  – плотность парожидкостной среды, кг/м<sup>3</sup>;

$k_c$  – коэффициент фильтрации парожидкостной среды, кг/(м·с·Па);

$\frac{dp}{dz}$  – градиент давления в слое шерсти, Па/м.

Поскольку из-за особенностей шерсти процесс ее сушки должен вестись при температуре не выше 80°C, то скорость фильтрации парожидкостной среды можно считать постоянной. Так как удаление влаги из слоя шерсти при СВЧ сушке происходит вследствие конвективного переноса парожидкостной среды к верхней поверхности слоя шерсти и с дальнейшим удалением ее из сушильной камеры, то естественно, что температура на ее верхней поверхности ниже, чем в середине объема. Следовательно, перенос тепла происходит из глубины объема слоя шерсти в свободное пространство над слоем.

Анализ результатов расчетов зависимости температуры влажной шерсти объемом 1м<sup>3</sup> с пористостью 0,71 м<sup>3</sup><sub>среды</sub>/м<sup>3</sup><sub>объема</sub> и исходной температурой 50°C, подвргающейся СВЧ сушке мощностью 5кВт в сушильной камере, от длительности воздействия и глубины образца показал, что в начальный момент сушки температура влажной шерсти на верхней границе объема шерсти подымается до 80°C, а в процессе сушки длительностью 3 минуты температура плавно снижается до 60°C как на верхней, так и на нижней границе объема [2]. Неравномерность распределения температуры в объеме влажной шерсти возникает вследствие интенсивного процесса парообразования и испарения. Так как верхняя граница объема шерсти совпадала с крышкой сушильной камеры, то выделившийся пар препятствовал уменьшению температуры на верхней границе. Необходимым условием СВЧ сушки является интенсивное удаление выделившегося пара.

Процесс сушки заканчивается после удаления влаги и температура шерсти по всему объему становится практически одинаковой. При СВЧ излучении мощностью 5мВт/см<sup>3</sup> сушка шерсти заканчивается к 150 секунде, а при мощности излучения 15мВт/см<sup>3</sup> – сушка шерсти заканчивается к 75 секунде [2]. Таким образом существенную экономию электроэнергии и затрат на СВЧ аппаратуру можно получить увеличением времени технологического процесса сушки.

Вышеперечисленные факторы обуславливают некоторые исключительные преимущества ЭМ сушки по сравнению с традиционной сушкой:

- высокий КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую;
- безинерционный нагрев объема шерсти "изнутри" с исключительно высокой интенсивностью (температура и скорость СВЧ-нагрева регулируются напряженностью  $E$  и частотой  $f$  ЭМП);
- бесконтактный экологически чистый подвод энергии;
- равномерный нагрев по всему объему шерсти и его избирательность в случае неравенства диэлектрических свойств (параметров  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$ ).
- быстрое включение и выключение нагрева;
- высокий темп нагрева (до нескольких десятков °C/с), при этом градиент температуры в волокнах шерсти существенно меньше, благодаря чему снижаются внутренние напряжения в волокнах, что позволяет избежать появления микротрещин, а соответственно и ломкости волокон;
- саморегулирующийся нагрев. При сушке качество получаемого материала существенно улучшается за счет того, что нагрев высушенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь шерсти прямо пропорционален влажности;
- тепловые потери в подводящих трактах обычно невелики, и стенки волноводов и рабочих камер остаются практически холодными, что создает комфортные условия для обслуживающего персонала;
- под воздействием интенсивного СВЧ поля происходит практически полное уничтожение микрофлоры (обеззараживание шерсти), что благоприятно сказывается на ее хранении.

---

### Вывод

---

Особенностью СВЧ сушки шерсти является зависимость процесса от диэлектрической постоянной каждого компонента трехкомпонентной системы (шерсть, связанная вода, подвижная вода) и их граммолей.

Возникающий при сушке шерсти значительный объем пара должен интенсивно удаляться с сушильной машины. При СВЧ сушке шерсти существенно снижаются удельные затраты энергии и улучшается ее качество.

---

### Литература

1. Черенков А.Д., Свергун Ю.Ф., Андрейчук Е.И. Использование СВЧ энергии для сушки влажной шерсти // Вісник науки і техніки. – Харків: Будинок науки і техніки. – 1999. №1. – С.37-42.
2. Черенков А.Д., Андрейчук Е.И. Теоретический анализ процесса СВЧ-сушки влажной шерсти. // Питання електрифікації сільського господарства. – Харків, 1998, с.97-100.
3. Артемонов Ю.С., Вынов Ю.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М.: Энергия, 1988. – 210 с.
4. Андрейчук Е.И., Кравченко П.А. Расчеты измерения диэлектрических параметров шерсти с использованием СВЧ облучения // Украинский метрологический журнал. – Харьков: ГНПО «Метрология». – 1999. №1. С.37- 42.
5. Окресс А. СВЧ-энергетика. – М.: Мир, 1965. – 750с.
6. Мустьяца В.Т. Тепло- и массообмен во влажных материалах в электрических полях высокой частоты. – Кишинев, Штинца, 1985. – 64с.