

**В.И. ВОДОТОВКА**, д-р техн. наук, проф., Национальный университет технологий и дизайна, Киев

**И.А. САСИМОВА**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Колледж перерабатывающей и пищевой промышленности ХНТУСХ им. П. Василенко

## ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ШЕРСТИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Процес сушки вовни в значній мірі залежить від діелектричної постійної вовни, зв'язаної та рухомої води, а також від градієнту тиску всередині шару вовни. Приведені переваги сушіння шерсті електромагнітним хвилями надвисокої частоти.

Процесс сушки шерсти в значительной степени зависит от диэлектрической постоянной шерсти, связанной и подвижной воды, а также от градиента давления внутри слоя шерсти. Приведены преимущества сушки шерсти электромагнитными волнами сверхвысокой частоты.

**Вступление.** Основным способом сушки шерсти является конвективный способ с помощью потоков горячего воздуха. Недостатками такого способа сушки является ухудшение качества шерсти: пожелтение, потеря упругости и прочности. Сушильные машины с конвективным способом сушки имеют существенные недостатки: большая длительность процесса сушки, значительный расход энергии, большая металлоемкость и габариты. Использование электромагнитных излучений СВЧ диапазона позволит устранить все эти недостатки.

**Цель, задание исследования.** Определение особенностей СВЧ сушки шерсти и ее преимуществ.

**Метод сушки.** Шерсть после мойки в барках и отжима на валковых устройствах имеет влажность около 60% [1], а для хранения ее влажность не должна превышать 19%.

Метод сушки с использованием 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 волокнистого материала, чем больше молекул участвует в этом движении, тем больше тепловой энергии выделяется. Таким образом, разогрев происходит во всем объеме шерсти, при-

чем более влажные участки получают больше энергии. За счет этого происходит удаление влаги, сушка шерсти и, одновременно, выравнивание влажности во всем объеме. Энергия СВЧ электрических полей в основном расходуется на создание условий, интенсифицирующих перенос влаги из глубинных слоев к поверхностям.

**Модель система шерсть-вода.** 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 °С 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]

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

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 [7]

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

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);

$\frac{\partial p}{\partial z}$  – 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 вдоль вертикальной оси  $z$ .

**Обсуждение результатов.** Анализ результатов расчетов зависимости температуры влажной шерсти объемом  $1\text{м}^3$  с пористостью  $0,71 \frac{\text{м}^3_{\text{среды}}}{\text{м}^3_{\text{объема}}}$  и исходной температурой  $50^\circ\text{C}$ , подвергающейся СВЧ сушке мощностью  $5\text{кВт}$  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  $80^\circ\text{C}$ , а в процессе сушки длительностью  $3$  минуты температура плавно снижается до  $60^\circ\text{C}$  как на верхней, так и на нижней границе объема [8]. 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  $5\text{мВт}/\text{см}^3$  сушка шерсти заканчивается к  $150$  секунде, а при мощности излучения  $15\text{мВт}/\text{см}^3$  – сушка шерсти заканчивается к  $75$  секунде [8]. Таким образом существенную экономию электроэнергии и затрат на СВЧ аппаратуру можно получить увеличением времени технологического процесса сушки.

Перечисленные факторы обуславливают некоторые исключительные преимущества СВЧ-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  $^\circ\text{C}/\text{с}$ , тогда как при обычном нагреве скорость нагрева до  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ ), 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 высу-

шенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь волокнистых материалов, как, например, шерсти, прямо пропорционален влажности. Поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери СВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность;

- 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;

- СВЧ оборудование взамен эксплуатирующегося сушильного оборудования позволяет значительно упростить технологическую схему сушки шерсти, исключив все процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя, а также вредные выбросы в атмосферу.

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

**Список литературы:** 1. Демидов А.В. Разработка и исследование валкового устройства для повышения эффективности отжима шерсти после промывки: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 "Машины, агрегаты, процессы (легкая промышленность)" / А.В.Демидов. – Иваново, 2004 – 20, [1]с. 2. Артемонов Ю.С., Вынов Ю.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М.: Энергия, 1988. – 210 с. 3. Бранут А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1964. – 404 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, Штиинца, 1985. – 64с. 7. Черенков А.Д., Андрейчук Е.И. Теоретический анализ процесса СВЧ-сушки влажной шерсти. // Питання електрифікації сільського господарства. – Харків, 1998, с.97-100. 8. 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.

*Поступила в редколлегию 16.03.2010*