

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.

Вступлення. 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 ϵ' – диэлектрическая постоянная;

ϵ'' – диэлектрические потери.

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' характеризует способность диэлектрика накапливать энергию, а мнимая ϵ'' 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 ϵ'' не имеет значительной зависимости от влажности и ее значение от 6 до 8 единиц при влажности 30%, а значение величины ϵ' 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]

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

где ϵ' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости материала;

δ – 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 ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$, 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 ∇u , ∇t , ∇p – соответственно градиенты влагосодержания, температуры и давления;

a_m – коэффициент диффузии влаги, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ_0 – плотность сухого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;

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 ∇u и ∇t в этом случае будет незначительным по сравнению с влагопереносом, который определяется градиентом давления ∇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]

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

где V – скорость фильтрации парожидкостной среды, $\text{м}/\text{с}$;

ρ – плотность парожидкостной среды, $\text{кг}/\text{м}^3$;

k_c – коэффициент фильтрации парожидкостной среды, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$;

$\frac{\partial p}{\partial z}$ – градиент давления в слое шерсти, $\text{Па}/\text{м}$.

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 м^3 с пористостью 0,71 $\frac{\text{м}^3_{\text{среды}}}{\text{м}^3_{\text{объема}}}$ и исходной температурой 50°C , подвергающейся 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 [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 Вт/см^3 сушка шерсти заканчивается к 150 секунде, а при мощности излучения 15 Вт/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 ϵ' и $\text{tg}\delta$).
- быстрое включение и выключение нагрева;
- высокий темп нагрева (до нескольких десятков $^\circ\text{C/с}$, тогда как при обычном нагреве скорость нагрева до 10°C/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 высушенных 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. Мустяца 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