

КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В ВАКУУМНЫХ СУШИЛЬНЫХ КАМЕРАХ

А.Н. Качанов, Д.А. Коренков

В статье приведены результаты анализа известных методов измерения влажности древесины, используемых в современном сушильном оборудовании. Изложены теоретические основы предложенного авторами метода измерения и контроля влажности древесины при её сушке в электротехнологических комплексах с использованием вакуума. Рассмотрена возможность применения данного метода при сушке древесины в вакуумно-диэлектрической камере.

Ключевые слова: сушка древесины, измерение влажности, сушка в вакууме.

Введение

Сушка является неотъемлемым этапом деревообработки, обеспечивающим повышение эксплуатационных характеристик древесины. Не зависимо от выбранного способа сушки, перед началом технологического процесса необходимо знать начальную влажность материала.

Для измерения влажности древесины наибольшее распространение получили следующие методы: термогравиметрический (высушивания), кондуктометрический, диэлькометрический. Первый метод основан на конвективном высушивании контрольного образца до состояния равновесия с окружающей средой, которое условно считается равнозначным полному удалению влаги [1]. Затем высушенный контрольный образец взвешивают, а влажность древесины определяют по формуле:

$$W = \frac{m_H - m_0}{m_0}, \quad (1)$$

где m_H – начальная масса контрольного образца; m_0 – масса образца в абсолютно сухом состоянии.

Кондуктометрический и диэлькометрический методы относятся к косвенным способам измерения влажности. В первом случае измеряется электропроводность материала: σ , во втором – диэлектрические параметры: вещественная (ϵ') или мнимая (ϵ'') составляющие диэлектрической проницаемости, диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Текущая влажность материала определяется на основе экспериментально полученных характеристик зависимости соответствующего параметра древесины от влажности при неизмен-

ной температуре и других величин влияющих на результаты измерений.

Каждый рассмотренный выше метод имеет свои достоинства и недостатки. Так, термогравиметрический метод исключает возможность его использования в системах автоматизированного управления из-за большой продолжительности сушки контрольного образца, тогда как современные сушильные комплексы требуют мгновенного и непрерывного контроля влажности. Этот недостаток может быть устранён с помощью электрических методов, которые также имеют свои недостатки. Так, например, при диэлектрической или вакуумно-диэлектрической сушке штабель древесины вместе с измерительными датчиками и соединительными проводами помещается в высокочастотное электрическое поле. При этом в проводах наводятся высокочастотные помехи. Несмотря на применение фильтрующих устройств, полное избавление от таких помех представляется непростой задачей. К тому же датчики влажности монтируются в контрольные образцы досок штабеля вручную, на что необходимы дополнительные затраты времени, и что исключает возможность полной автоматизации процесса сушки.

Немаловажным фактором является ярко выраженная анизотропность свойств древесины, а также вероятностный характер распределения её полезных и мешающих параметров. Это требует большого объёма выборки, при которой средние значения этих параметров становятся практически равными своим математическим ожиданиям [2]. Современные системы автоматизации процессов сушки не позволяют осуществить большое число локальных измерений влажности в различных точках штабеля.

Таким образом, разработка и внедрение новых автоматических систем и методов измерения влажности в технологический процесс сушки пиломатериалов является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить степень автоматизации сушильных комплексов.

На рынке сушильного оборудования в последнее время всё большее распространение получают комплексы, в которых процесс сушки осуществляется в вакууме. Примером могут служить вакуумно-диэлектрические сушильные комплексы, в которых материал, помещенный в высокочастотное электрическое или сверхвысокочастотное электромагнитное поле, нагревается за счёт возникновения в нем внутренних источников теплоты. В состав электротехнического комплекса входит герметичная рабочая камера, из которой после загрузки штабеля древесины откачивается воздух. Последние операции можно совместить с измерением начальной влажности штабеля с помощью предлагаемого метода, который основан на измерении количества удаляемого из рабочей камеры воздуха.

Основы метода

Обозначим объём рабочей камеры - V . До начала работы вакуумной системы в камере находится воздух массой m , а давление воздуха равно атмосферному $p_1 = p_{\text{атм}}$. Исходная масса воздуха равна сумме остаточной $m_{\text{ост}}$ и удалённой $m_{\text{уд}}$ масс:

$$m = m_{\text{ост}} + m_{\text{уд}} \quad (2)$$

После установления требуемого режимом сушки давления $p_2 < p_1$, в камере будет находиться остаточная масса воздуха $m_{\text{ост}}$. Для установления зависимости $m_{\text{ост}} = f(m_{\text{ост}})$ приняты следующие допущения:

- температура воздуха принимается неизменной, что соответствует действительности, когда стадия вакуумирования предшествует нагреву;

- p_i относительно высоких температурах и низких давлениях в рабочей камере можно считать, что воздух – идеальный газ.

С учётом принятых допущений, состояния воздуха до вакуумирования и после можно описать уравнением состояния идеального газа:

$$P_1 V = \frac{m}{M} RT, \quad (3)$$

$$P_2 V = \frac{m_{\text{ост}}}{M} RT, \quad (4)$$

где M – молярная масса воздуха;
 R – универсальная газовая постоянная,
 $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(К·моль).

Разделяя переменные и постоянные величины в уравнениях (3) и (4) получим:

$$\frac{P_1}{m} = \frac{RT}{MV}, \quad (5)$$

$$\frac{P_2}{m_{\text{ост}}} = \frac{RT}{MV}. \quad (6)$$

Приравняв левые части равенств (5) и (6) с учетом (2) получим следующее уравнение:

$$\frac{P_1}{m_{\text{ост}} + m_{\text{уд}}} = \frac{P_2}{m_{\text{ост}}}.$$

Из последнего выражения получаем зависимость остаточной массы воздуха от удалённой:

$$m_{\text{ост}} = \frac{P_2 m_{\text{уд}}}{P_2 - P_1}. \quad (7)$$

Используя уравнение состояния атмосферы [3], не составит трудности учесть не идеальность свойств влажного воздуха.

Зная массу воздуха, оставшегося в камере и его плотность, которая зависит от давления p , температуры T и относительной влажности d , определим объём загруженного штабеля древесины:

$$V_d = V - \frac{m_{\text{ост}}}{\rho_w(p, T, d)} = V_{\text{max}}. \quad (8)$$

Зависимости плотности воздуха от температуры, давления и влагосодержания достаточно подробно изучены. Расчётные формулы, полученные эмпирическим путем приведены в [4].

Вычисленный по формуле (8) объём древесины является максимальным при условии, что загруженная древесина имеет начальную влажность выше предела насыщения ($> 30\%$), так как на усушку или разбухание влияет только связанная влага. Связанная влага накапливается в клеточных стенках и может содержаться в древесине только в ограниченном количестве, соответствующем пределу насыщения.

Путём деления массы штабеля (о её измерении будет сказано ниже) на объём, полученный из (8), найдём плотность древесины, соответствующую влажности W :

$$\rho_w = \frac{m_H}{V_d}. \quad (9)$$

Между плотностью влажной древесины ρ_w и её плотностью в абсолютно сухом состоянии ρ_0 существует определённая зависимость. В процессе сушки от некоторой начальной влажности W до предела гигроскопичности удаление свободной влаги не приводит к уменьшению объёма. В этом случае указанная зависимость имеет вид [4]:

$$\rho_w = \rho_0 \frac{100+W}{30k_p+100}, \quad W > 30\% \quad (10)$$

где k_p - объёмный коэффициент разбухания.

При снижении влажности ниже предела насыщения из древесины удаляется связанная влага, что приводит к уменьшению объёма, в этом случае плотности ρ_w и ρ_0 связаны соотношением:

$$\rho_w = \rho_0 \frac{100+W}{Wk_p+100}, \quad W < 30\% \quad (11)$$

Объёмный коэффициент разбухания и плотность в абсолютно сухом состоянии сильно зависят от породы древесины. Значения данных параметров приведены в [4].

Выразим из (10) и (11) значения влажности:

$$W = \frac{\rho_w}{\rho_0} (30k_p - 100) - 100, \quad W > 30\%; \quad (12)$$

$$W = \frac{100(\rho_0 - \rho_w)}{\rho_w k_p - \rho_0}, \quad W < 30\%. \quad (13)$$

Поскольку сушке подвергается обычно свежесрубленная древесина, влажность которой может достигать 60-80%, то вычисление начальной влажности следует проводить по формуле (12).

Таким образом, по вычисленной плотности древесины, которая определяется на основе измеренной массы удалённого воздуха, можно судить о начальной влажности штабеля. Однако для автоматического управления процессом сушки недостаточно знать начальную влажность, также необходимо иметь возможность её непрерывного контроля. В процессе сушки из древесины испаряется влага, скорость её испарения трудно поддаётся точной оценке, поэтому контролировать влажность описанным способом уже не представляется возможным.

Известен метод контроля влажности пиломатериала на основе измерения его массы [5]. Способ заключается в определении влажности пиломатериала непосредственно в процессе сушки путём анализа характера изменения во времени массы штабеля. Элек-

трические сигналы от тензометрических датчиков веса поступают в сумматор, где определяется масса штабеля в текущий момент времени m^t . Затем по трём – четырём значениям измеренной массы в разные моменты времени производится аппроксимация, вычисляется степенной полином зависимости текущей массы штабеля от времени сушки. Следует отметить, что период времени между измерениями может составлять от 1 до 10 часов в зависимости от породы древесины, выбранного режима сушки. Полученный полином дифференцируется, результатом чего является уравнение скорости сушки. Его решение даёт значение продолжительности сушки, по которому с учётом равновесной влажности $W_{рав}(t, \varphi)$ рассчитывается конечная масса штабеля $m^{кон}$. Влажность пиломатериала в любой момент времени вычисляется по формуле:

$$W^t = \frac{m^t}{m^{кон}} \left(1 + \frac{W_{рав}(t, \varphi)}{100} \right)^{-1} \cdot 100\% \quad (14)$$

Повысить эффективность данного метода измерения можно, если заменить процедуру прогнозирования конечной массы штабеля на процедуру расчёта его конечного объёма, то есть объёма в абсолютно сухом состоянии V_0 . Относительное изменение объёма от V_{max} до V_0 древесины характеризуется полной усушкой:

$$y_{max} = \frac{V_{max} - V_0}{V_{max}} \cdot 100\%. \quad (15)$$

С достаточной степенью точности можно сказать, что между усушкой и убылью влаги существует прямая пропорциональная связь. Коэффициент усушки вычисляют по формуле с точностью до 0,01 % на 1 процент влажности древесины [4]:

$$k_y = \frac{y_{max}}{30}. \quad (16)$$

Также как коэффициент разбухания, коэффициент усушки зависит от породы древесины. С учётом (15) и (16) запишем:

$$V_0 = V_{max} (1 - 0,3k_y). \quad (17)$$

Искомую влажность древесины в момент времени t определим по формуле (1):

$$W^t = \frac{m^t - V_0 \rho_0}{V_0 \rho_0}. \quad (18)$$

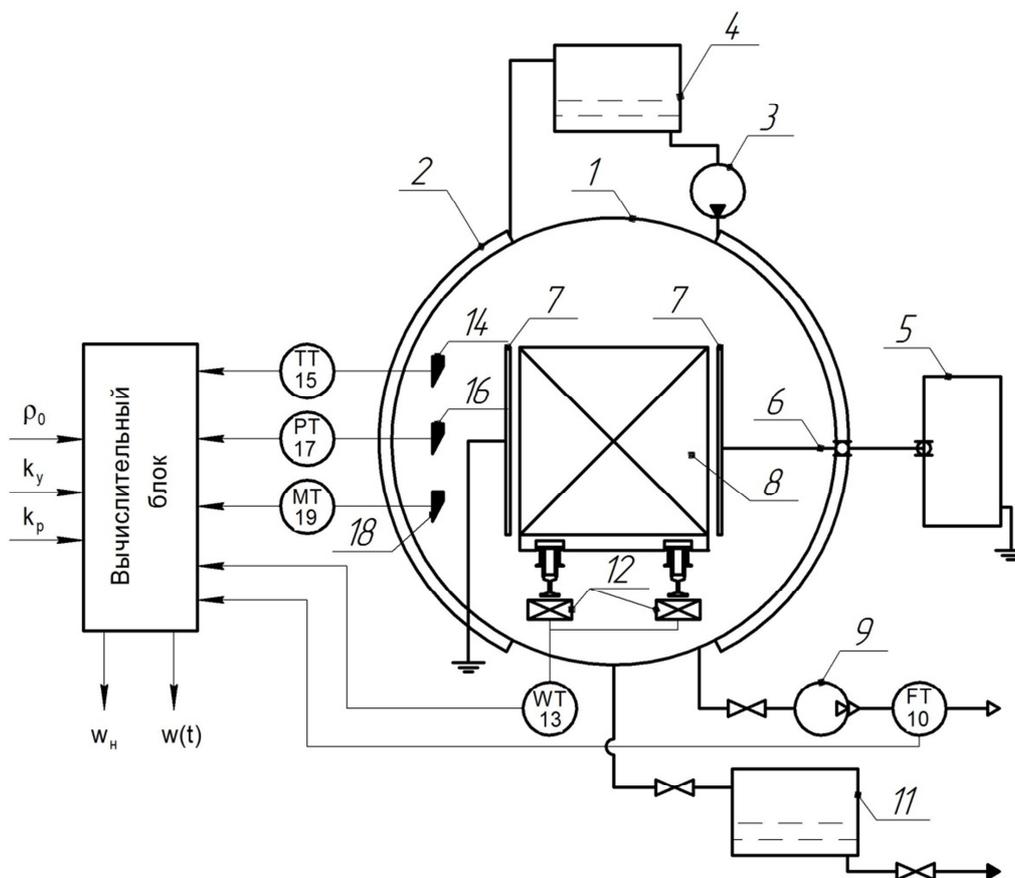


Рисунок 1 – Функциональная схема вакуумно-диэлектрического комплекса
 1 – рабочая камера; 2 – охлаждающая рубашка; 3 – циркуляционный насос; 4 – резервуар с охлаждающей жидкостью; 5 – высокочастотный генератор; 6 – высокочастотный фидер; 7 – электроды; 8 – штабель древесины; 9 – вакуумный насос; 10 – массовый расходомер; 11 – сборник конденсата; 12 – тензометрические датчики веса; 13 преобразователь массы; 14 – датчик температуры; 15 – преобразователь температуры; 16 – датчик давления; 17 – преобразователь давления; 18 – датчик влажности среды; 19 – преобразователь влажности.

Пример реализации

В качестве примера рассмотрим функциональную схему вакуумно-диэлектрической камеры с предлагаемой системой измерения и контроля влажности древесины, показанную на рисунке 1. Как отмечается в [6], камеры такого типа наиболее целесообразны в случае сушки ценных пород древесины и высоких требованиях к качеству сушки.

Герметичная рабочая камера 1 имеет охлаждающую рубашку 2, необходимую для конденсации паров влаги, испаряющейся в ходе процесса сушки. Охлаждающая жидкость циркулирует по рубашке под действием насоса 3, затем возвращается в резервуар 4, где остывает до температуры окружающей среды. Высокочастотный генератор 5 служит источником энергии, которая по фидеру 6 поступает на электроды 7. Между электродами

образуется высокочастотное электрическое поле. В штабеле 8 за счёт релаксационно-поляризационных эффектов выделяется тепло [7]. Для создания пониженного давления служит вакуумный насос 9. Испарившаяся из древесины влага частично удаляется вакуумным насосом, частично конденсируется и скапливается в сборнике конденсата 11.

Под действием веса штабеля изменяется сопротивление тензометрических датчиков 12. Преобразователь массы 13 вычисляет массу штабеля, полученная информация передаётся в вычислительный блок. Информация от датчиков температуры 14, давления 16 и влажности среды 18 подаётся на соответствующие преобразователи 15, 17 и 19, где формируются электрические сигналы, направляемые в вычислительный блок.

Список перечисленного оборудования не является исчерпывающим, но базовым для

камер такого типа, и приводится только для того, чтобы показать, что для практической реализации предлагаемого метода контроля влажности конструкция камеры должна быть дополнена массовым расходомером 10, измеряющим объём удалённого воздуха, а программная часть вычислительного блока должна содержать соответствующие алгоритмы расчёта и базы данных.

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод контроля влажности устраняет многие из отмеченных недостатков других методов измерения. Прежде всего, нет необходимости тратить время на продолжительную сушку контрольного образца или на размещение кондуктометрических и диэлькометрических датчиков. Благодаря применению системы измерения массы штабеля результаты носят не локальный характер, свойственный для электрических методов, а общий для всего штабеля, что позволяет более точно оценить расходы энергии и время сушки. В свою очередь замена процедуры прогнозирования конечной массы штабеля $m^{кон}$ на расчёт массы в абсолютно сухом состоянии $V_0\rho_0$ по измеренной массе удалённого воздуха даёт возможность точно оценить расходы энергии и время сушки ещё до начала сушки. Однако область использования этого метода ограничивается комплексами, в которых применяется вакуумная технология сушки. Главное требование метода – знать породу древесины, подлежащей сушке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинер, М.А. Измерение влажности [Текст] / М.А. Берлинер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.: ил.
 2. Музалевский, В.И. Измерение влажности древесины [Текст] / В.И. Музалевский. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 120 с.
 3. Трухин, В.И. Общая и экологическая геофизика [Текст] / В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
 4. Богданов, Е.С. Справочник по сушке древесины [Текст] / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов. – под. редакцией Е.С. Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с.
 5. Пат. 2037755 Российская Федерация, Устройство для определения влажности пиломатериалов [Текст] / Лыготчикова А.Я.; Шибина А.Г.; Горбая А.Р.; Буранова Г.И.; патентообладатель Лыготчиков Александр Яковлевич; заявл. 13.05.1993; опубл. 19.06.1995.
 6. Качанов, А.Н. Техничко-экономический анализ способов сушки древесины [Текст]; / А.Н. Качанов, В.Г. Сальников, М.Н. Чукумов // Проблемы энергетики Казахстана. – Алматы: Гылым, 1994. – С. 60–62.
 7. Дьяконов, К.Ф. Сушка древесины токами высокой частоты [Текст] / К.Ф. Дьяконов, А.А. Горяев. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 211 с.
- Качанов А.Н.** – «Госуниверситет – УНПК», заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение», д.т.н., профессор, тел. (4862)432188,
E-mail: kan@ostu.ru
- Коренков Д.А.** - аспирант ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»,
E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru,
тел. (4862) 41-66-84,