

С.А. Бондарь.

ВАКУУМНАЯ И ПРЕСС- ВАКУУМНАЯ СУШКА ДРЕВЕСИНЫ.

Уже достаточно долгое время в России обсуждается среди специалистов по деревообработке способ сушки пиломатериалов в вакууме. Интерес к проблеме возник после появления сначала сообщений об установках итальянского производства, а затем и самой продукции фирмы WDE Maspell на нашем рынке. Через некоторое время выпуск аналогичных сушильных камер освоили и ряд отечественных компаний- «Энергия-Ставрополь», «Wood-Lander», МВ-Импульс, Вояджер-Восток и др. Повышенное внимание к этим установкам объясняется тем, что их производители анонсируют сушку пиломатериала в небывало короткие сроки- 1-4 сут в зависимости от породы и толщины древесины и при этом высокое качество получаемой в результате доски или заготовки. Такие сроки сушки вызвали у многих, кто не имел возможности на практике проверить реальное качество продукции то недоверие, развеять которое не даёт крайне скудная информация от производителей о сути процесса вакуумной сушки. Попытаемся разобраться.

Сушка пиломатериалов в условиях пониженного давления (обычно $p_{абс}=0,15-0,4$ бар абсолютного давления или $p_{разр}=0,85-0,6$ бар разрежения , чему соответствует значение температуры насыщения $t_{нас} =54,0-75,9$ °С соответственно) относится к т.н. «высокотемпературному» процессу сушки. Такой тип процесса имеет место в случае, когда температура древесины $t_{др}$ превышает температуру насыщения $t_{нас}$ водяного пара при данном давлении. Протекание высокотемпературного процесса сушки отличается большей интенсивностью по отношению к низкотемпературному процессу, когда температура древесины меньше температуры насыщения ($t_{нас} = t_{кип}$ - температура кипения). Высокотемпературный процесс сушки проходит в две стадии: первая – до полного удаления свободной влаги по всей толщине доски вплоть до центральной плоскости и вторая- сушка до заданной конечной влажности с удалением только связанной влаги. Скорость высокотемпературной бездефектной сушки по отношению к нормативным ГОСТовским режимам конвективной камерной сушки выше в 4-5 раз. Так, например для группы твёрдолиственных пород (бук, клён, ясень, вяз и др.) нормативное время сушки для низкотемпературного конвективного режима при толщине доски 50 мм составляет 12-14 суток, время же сушки в вакуумных и пресс-вакуумных установках для этих же сортиментов -3-4 суток. Процесс высокотемпературной сушки описан в отечественной литературе как минимум с 1957 года и затем получил своё теоретическое описание. Приведём ниже некоторую информацию по древесиноведению и теории высокотемпературного процесса сушки из литературных источников.

«Вода может находиться в двух основных структурных элементах древесины: в полостях клеток и сосудов – свободная влага и в стенках клеточных оболочек- гигроскопическая, или связанная, влага. ...При сушке влажной древесины в первую очередь в пределах клетки полностью удаляется свободная влага и лишь затем, ниже предела гигроскопичности ($w_{пт}$ - одновременно являющегося пределом усушки), начинает испаряться из её оболочки связанная. При уменьшении содержания в древесине связанной влаги ...древесина усыхает». (Цитирование по [1]).

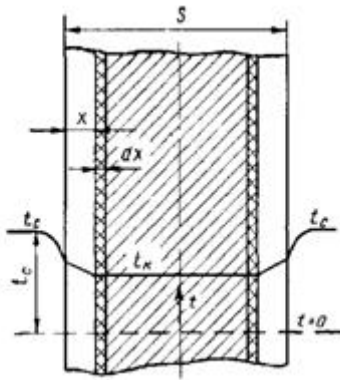


Рисунок и текст далее по [4].

Рассмотрим случай сушки сырой ($W_n > W_{п.н}$) древесины в форме неограниченной пластины в газовой среде с температурой $t_c > 100^\circ\text{C}$. На некотором промежуточном этапе процесса (рис. 41) из наружных зон пластины толщиной x удалена вся свободная влага. Влажность этих зон изменяется от равновесной на поверхности до предела насыщения внутри и имеет некоторое среднее значение $W_{пер}$. Внутренняя зона толщиной $(S - 2x)$ на этом этапе остается сырой, имея влажность близкую к начальной. Температура внутренней зоны поддерживается на уровне точки кипения воды t_k , а в поверхностных зонах и пограничном слое газообразной среды постепенно повышается до t_c .

На границе между зонами происходит выпаривание свободной влаги, за счет чего эта граница постепенно заглубляется.

Объяснить возможность сохранения безупречного качества сушки при столь значительной интенсивности высокотемпературного (даже не обязательно с использованием вакуума) процесса можно учитывая тот факт, что на первом- наиболее опасном с точки зрения появления дефектов сушки- этапе при достижении температуры насыщения $t_{нас}$, являющейся функцией давления « $p_{кам}$ », при котором ведётся процесс сушки в камере, сначала на поверхности, а затем- по мере продвижения вглубь- и в толще пиломатериала происходит интенсивное испарение свободной воды древесины (псевдокипение). В течение всей первой стадии сушки происходит продвижение образовавшегося водяного пара наружу и одновременно заглубление зоны выпаривания вплоть до центральной плоскости. На этом (после удаления всей свободной влаги) первый этап сушки заканчивается, в древесине остаётся только связанная влага, удаление которой до некоторого предела $w_{конеч}$, является задачей второго этапа сушки.

В паровой среде при её температуре « t » и относительной влажности « ϕ » значение влажности древесины « w » стремится к равновесной влажности [2]:

$$w_p = 10,6 \left(\frac{\phi}{100} \right) * (3,27 - 0,015t), \%, \text{ здесь:}$$

$$t = (t_{нас} + \Delta t)$$

$$\phi = \rho / \rho_{нас}$$

Значения для температуры насыщения - $t_{нас}$, удельного объёма и плотности водяного пара на линии насыщения - v'' , $\rho_{нас} = 1/v''$ принимаются при данном « $p_{кам}$ », значения этих параметров для перегретого пара - v , $\rho = 1/v$ - принимаются при « $p_{кам}$ » и « t »- в соответствии с данными Таблиц физических свойств воды и водяного пара [5].

С погрешностью не более 0,5% можно в интервале температур $t_{\text{нас}}$ от 50°C до 100°C для температур перегрева Δt до 30°C, характерных в практике вакуумной сушки, можно принять:

$$\varphi = (273 + t_{\text{нас}})/(273 + t_{\text{нас}} + \Delta t) = T_{\text{нас}} / (T_{\text{нас}} + \Delta t).$$

При $t_{\text{нас}} = 54^\circ\text{C}$ и $\Delta t = 36^\circ\text{C}$ вычислим: $\varphi(54; 36) = (273+54)/(273+54+36) = 0,901$; $w_p = 10,6^{0,901} (3,27 - 0,015 \cdot 54) = 20,641\%$.

При $t_{\text{нас}} = 54^\circ\text{C}$ и $\Delta t = 36^\circ\text{C}$ по Таблицам[6]: $v'' = 10,02 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v = 11,15 \text{ м}^3/\text{кг}$, $\varphi(100; 30) = v''/v = 10,02/11,15 = 0,8987$, $w_p = 10,6^{0,8987} (3,27 - 0,015 \cdot 54) = 20,53\%$.

При $t_{\text{нас}} = 100^\circ\text{C}$ и $\Delta t = 30^\circ\text{C}$ вычислим $\varphi(100; 30) = 0,926$; $w_p = 10,6^{0,926} (3,27 - 0,015 \cdot 130) = 11,75\%$.

При $t_{\text{нас}} = 100^\circ\text{C}$ и $\Delta t = 30^\circ\text{C}$ по Таблицам[6]: $v'' = 1,694 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v = 1,841 \text{ м}^3/\text{кг}$, $\varphi(100; 30) = v''/v = 1,694/1,841 = 0,92015$, $w_p = 10,6^{0,92015} (3,27 - 0,015 \cdot 130) = 11,59\%$.

При кипении имеет место значение относительной влажности пара $\varphi_{\text{пар}} = 100\%$ (для насыщенного пара) и этому соответствует значение равновесной влажности древесины, равное пределу гигроскопичности $w_p = w_{\text{пг}}$ ($w_{\text{пг}} = 26,1\%$ при $t = t_{\text{нас}} = 54^\circ\text{C}$ и $w_{\text{пг}} = 22,6\%$ при $t = t_{\text{нас}} = 75,9^\circ\text{C}$). Влажность « $w_{\text{пг}}$ » является функцией только температуры:

$$w_{\text{пг}} = 10,6(3,27 - 0,015t) \text{ или:}$$

$$w_{\text{пг}} = (34,66 - 0,159 \cdot t_{\text{нас}}), \%$$

При $t_{\text{нас}} = 54^\circ\text{C}$ вычислим $w_{\text{пг}} = 26,08\%$.

При $t_{\text{нас}} = 100^\circ\text{C}$ вычислим $w_{\text{пг}} = 18,76\%$.

Значение « $w_{\text{пг}}$ » характеризуется тем, что является границей, ниже которой свободной влаги нет ни в полостях клеток, ни в межклеточном пространстве древесины. При $w < w_{\text{пг}}$ начинается усушка древесного волокна. Таким образом, при $w_p = w_{\text{пг}}$, в зоне испарения свободная вода интенсивно удаляется при отсутствии усушки, а следовательно и при минимальных напряжениях в наружных слоях древесины. По мере продвижения зоны парообразования в толщу пиломатериала температура наружных слоёв $t_{\text{нар}} = (t_{\text{нас}} + \Delta t)$ повышается на « Δt » относительно температуры насыщения, их равновесная влажность :

$$w_{\text{нар}} = 10,6^{[(\frac{\varphi}{100}) - 1]} \cdot w_{\text{пг}} = (w_{\text{пг}} - \Delta w)$$

снижается на « Δw » относительно предела гигроскопичности « $w_{\text{пг}}$ »:

$$\Delta w = w_{\text{пг}} \cdot [1 - 10,6^{(\varphi - 100)/100}]$$

При $\varphi(54; 36) = 0,901$ вычислим $\Delta w(54; 36) = 0,208 \cdot w_{\text{пг}} = 5,436\%$

По Таблицам: $\Delta w_{\text{табл}}(54; 36) = 26,08 - 20,53 = 5,546\%$

При $\varphi(100; 30) = 0,926$ вычислим $\Delta w(100; 30) = 0,160 \cdot w_{\text{пг}} = 3,000\%$

По Таблицам: $\Delta w_{\text{табл}}(100; 30) = 18,76 - 15,54 = 3,221\%$

При значении Δw наружные слои получают деформации растяжения $\epsilon = Y$, подвергаясь стеснённой усушке :

$$Y = \alpha * \Delta w$$

и испытывая при этом напряжения растяжения:

$$\sigma = E * \epsilon$$

(здесь ϵ - относительное растяжение поверхностных слоёв, $Y = (\text{Ш}_{\text{пг}} - \text{Ш}_w) / \text{Ш}_{\text{пг}}$ - относительная свободная усушка поверхностных слоёв, $\text{Ш}_{\text{пг}}$ - ширина доски при её влажности $w \geq w_{\text{пг}}$, Ш_w - ширина при влажности для случая свободной усушки, α - коэффициент усушки, E - длительный модуль упругости древесины при заданных w и t).

Регулированием подводимой тепловой мощности можно поддерживать допустимое значение Δt (соответственно Δw и ϵ) и тем самым, ограничивая нарастание напряжений σ , добиться бездефектной сушки, чему способствует и постоянное «пропаривание» наружных слоёв древесины паром, движущимся от внутренних слоёв наружу.

Сравним $\Delta w_{\text{табл}}(54;36) = 5,546\%$ со значением Δw , имеющим место на первой ступени при $w > 30\%$ низкотемпературного режима при конвективной сушке, например бука 50 мм – $t = 57^\circ\text{C}$, $\phi = 85\%$ - в соответствии с Руководящими материалами по камерной сушке древесины [6].

$$\Delta w_{16} = (34,66 - 0,159 * 57) * [1 - 10,6^{-(0.15)}] = 7.633\% > \Delta w_{\text{табл}}(54;36) = 5,546\%$$

$$\sigma_{16} / \sigma_{54;36} = w_{16} / \Delta w_{\text{табл}}(54;36) = 7.633 / 5,546 = 1,376$$

Т.е при вакуумной сушке её скорость в 4 раза выше, а возникающие в древесине напряжения в 1,38 раза меньше!

На втором этапе сушки- при удалении связанной влаги- опасности возникновения дефектов практически нет. Этот этап можно сравнить с третьей ступенью сушки при $w < 20\%$ для нормального режима низкотемпературного процесса по [6].

Для обеспечения эффективной работы установок, не использующих конвекцию для реализации высокотемпературного процесса, – атмосферных, вакуумных и пресс-вакуумных (безотносительно конструктивных отличий и особенностей исполнения оборудования конкретным производителем), следует учитывать три обязательных условия.

Первое условие заключается в том, что пиломатериал загружается в камеру послойно с плоскими нагревателями – греющими пластинами, чем обеспечивается равномерная и интенсивная теплопередача. Второе условие – температура поверхности нагревателей превышает температуру насыщения (кипения) при созданном в установке давлении(разрежении) – по определению.

Третье условие (не являющееся обязательным для атмосферных установок) заключается в том, что в полости камеры создается пониженное – относительно атмосферного – давление. Если верхняя крышка камеры выполнена в виде гибкой мембраны (обычно из силиконовой резины), то за счет разности значений давления создается прижимающее усилие между слоями пиломатериала и нагревателями, передаваемое послойно на металлическую конструкцию днища камеры. Это прижимающее усилие обеспечивает идеально плоскую форму досок

и плотное прилегание поверхности пиломатериалов к нагревателям, что очень важно в случае, если теплопередача между ними осуществляется кондуктивным путем. В этом варианте необходима точная калибровка по толщине пиломатериала для исключения неплотности прилегания досок к нагревателям.

Для того, чтобы обеспечить равномерность теплопередачи от нагревателей к поверхности досок без их калибровки, разумно организовать нагрев тепловым излучением через специально созданный (за счёт специальных выступов греющих пластин- используется в установках «Энергия-Ставрополь» и «Wood-Lander») небольшой зазор между плоскостью нагревателей и пиломатериалом. Теплопередача излучением в плоском зазоре не зависит от его величины и, следовательно, от неизбежного разбега пиломатериала по толщине.

Как было сказано выше, для осуществления высокотемпературного процесса сушки вакуумирование не является необходимым условием, однако в пресс-вакуумных сушильных установках используются дополнительные плюсы, которые предоставляет понижение давления внутри камеры. Во первых- снижение температуры процесса уменьшает тепловые потери и минимизирует обусловленное ею изменение цвета древесины. Во вторых- эффект мембранного пресса сказывается на идеальном фиксировании плоскости высушиваемых досок и заготовок. В третьих- плотный прижим слоёв нагревателей и слоёв пиломатериала обеспечивает идеальную равномерность процесса сушки.

Для сушки толстых сортиментов трудносохнущих пород (дуб) применяются специальные режимы на стадиях влажности древесины выше и ниже предела гигроскопичности. Применение этих режимов обеспечивает бездефектную сушку 50 мм дубового сортимента в течение 6-8 суток.

Процесс пресс-вакуумной сушки древесины реализуется в установках с разовой загрузкой от 0,5 до 10 м³, обеспечивая в доске толщиной 50 мм твердолиственных пород (при продолжительности процесса сушки 4 суток) – семь с половиной, а в случае хвойных пород (при продолжительности процесса сушки 2 суток) - пятнадцать оборотов камеры (циклов сушки) в месяц, в доске толщиной 30 мм твердолиственных пород (при продолжительности процесса сушки 2 суток) –15 оборотов, хвойных пород (при продолжительности процесса сушки 1 сутки -30 оборотов в месяц.

Испарившаяся из древесины вода в количестве примерно 250 литров на куб.м пиломатериала конденсируется на металлических стенках камеры и (при наличии)в теплообменнике- конденсаторе. Периодически конденсат сливается в канализацию.

В заключение в качестве примера приведём некоторые данные по особенностям конструктивного исполнения наиболее распространённых пресс-вакуумных камер сушки древесины.

В прессвакуумных камерах «Энергия-Ставрополь», «Wood-Lander» и WDE Maspell (Италия) применяются водяные плоские нагреватели, производители других фирм - МВ-Импульс, Вояджер-Восток и др. -применяют нагреватели с электрическими омическими греющими элементами. На установках WDE Maspell устанавливаются электрические водяные котлы, в камерах «Энергия-Ставрополь» и «Wood-Lander», их конструкция позволяет использовать как электрические, так и газовые (пропан/природный газ) водонагревательные котлы в качестве источников нагрева. В силу того, что стоимость 1 МДж тепловой энергии составляет для электроэнергии, пропана и природного газа соответственно 1,5 руб/МДж, 0,75 руб/МДж и 0,1 руб/МДж, становится

очевидной выгода от использования газа для сушки древесины. Понятно, что качество высушенного пиломатериала не зависит от применяемого энергоносителя, а определяется используемыми технологическими режимами сушки и корректной работой автоматики по реализации этих режимов.



Камера загрузкой 2 куб.м с газовым котлом «Энергия-Ставрополь».



Камера с загрузкой 0,6 куб.м WDE Maspell .

Литература.

1. Кречетов И.В. Сушка древесины.1972.
2. Шубин Г.С. Физические основы и расчёт процессов сушки древесины.1973.
3. Микит Э.А., Упманис К.К. Интенсификация сушки пиломатериалов в камерах периодического действия. 1957.
4. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. 1975.
5. Александров А.А... Таблицы физических свойств воды и водяного пара. 1999.
6. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. 1985.